



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



**ALINE MIRANDA CECILIO**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE VIDRO POR MEIO DA  
RECICLAGEM DE ESCÓRIA DE ACIARIA, ESCÓRIA DE ALTO  
FORNO E RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO**

**VOLTA REDONDA**

**2023**

**ALINE MIRANDA CECILIO**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE VIDRO POR MEIO DA  
RECICLAGEM DE ESCÓRIA DE ACIARIA, ESCÓRIA DE ALTO  
FORNO E RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais reciclados, compósitos, nanomateriais e biomateriais e linha de pesquisa em materiais compósitos.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago

Coorientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciana Ghussn

VOLTA REDONDA

2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

C388o Cecílio, Aline Miranda

Obtenção e caracterização de vidro por meio da reciclagem de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição. / Aline Miranda Cecílio. - Volta Redonda: UniFOA, 2023. 67 p.: Il

Orientador (a): Prof. Roberto de Oliveira Magnago

Coorientador (a): Profa. Luciana Ghussn

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2023

1. Materiais - dissertação. 2. Economia circular. 3. Passivo ambiental. 4. Simbiose industrial. I. Magnago, Roberto de Oliveira. II. Ghussn, Luciana. III. Centro Universitário de Volta Redonda. IV. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



**ALINE MIRANDA CECILIO**


OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE VIDRO POR MEIO DA RECICLAGEM DE ESCÓRIA DE  
ACIARIA, ESCÓRIA DE ALTO FORNO E RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago


Coorientadora: Luciana Ghussn

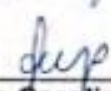
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE  
"MESTRE EM MATERIAIS"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO  
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago  
Presidente / UniFOA

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ana Carolina Callogario Pereira  
Examinador externo / UniFOA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Raphael Midea Cuccovia Vasconcelos Reis  
Examinador externo / UFF

Fevereiro de 2023.

## DEDICATÓRIA

À Deus, que em sua infinita bondade, conferiu à Humanidade o milagre da vida, a dádiva do saber e a virtude de criar.

Àquele que sempre alimentou a minha fé na Humanidade e o meu desejo insaciável de, olhando para o passado, contribuir para o nosso futuro.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao coordenador, professores e secretárias do Programa de Mestrado Profissional em Materiais (MEMAT) do Centro Universitário de Volta Redonda – Fundação Oswaldo Aranha (UniFOA), que sempre foram muito atenciosos e preocupados com a qualidade de ensino, enfrentando todos os desafios impostos durante o acometimento de uma pandemia através da reconstrução do processo de ensino-aprendizagem. Parabênzo-lhes pelo elevado grau de empenho e dedicação e por ter contribuído ativamente à minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago e à minha coorientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luciana Ghussn, que desde o início acreditaram em meu trabalho e me deram autonomia e liberdade para execução, dividindo comigo as expectativas e me conduzindo a concretização deste projeto com dedicação ímpar.

À Saint-Gobain Canalização e à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em especial à Bruna Lacerda, ao Fernando Puell, ao Cláudio Graffunder e ao Giulio Tadeucci, pela oportunidade concedida, fornecendo os materiais, informações e estruturas necessárias para dar suporte às atividades realizadas. Aos meus queridos colegas Alexsander Giacomini, Rodrigo Delfino e Nathalia Duarte, sem os quais este trabalho não poderia ter sido concluído.

Estendo ainda os meus agradecimentos aos meus amados pais, Eugenia Maria Rodrigues Miranda e Ricardo Luiz Martins Pinto, por sempre acreditarem em mim e terem abdicado de suas vidas em prol das minhas realizações. À minha irmã Alessandra Cecilio e aos meus avós Antônio Matias Miranda, Maria Lucinda Miranda, Eliene Cecilio, Walter Pinto e Sônia Martins, por serem essenciais em toda a minha vida e terem sido responsáveis pela pessoa que me tornei. Agradeço ainda ao meu amado esposo, Bryan Luiz Silveira Sipião, que sempre me incentivou a ser uma pessoa melhor e a nunca desistir dos meus sonhos.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a concretização deste sonho, deixo o meu mais sincero agradecimento.

## EPÍGRAFE

“Você é aquilo que ninguém vê. Uma coleção de histórias, estórias, memórias, dores, delícias, pecados, bondades, tragédias, sucessos, sentimentos e pensamentos.

Se definir é se limitar.

Você é um eterno parêntese em aberto enquanto a sua eternidade durar.”

(Machado de Assis)

CECILIO, A. M. **Obtenção e caracterização de vidro por meio de reciclagem de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição.** 2023. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2023.

## RESUMO

O gerenciamento de resíduos sólidos tornou-se, com o passar dos anos, uma das principais preocupações ambientais, tendo sido foco de diversas conferências internacionais e regulamentações específicas. No que tange a esta temática, há uma preocupação especial em relação aos resíduos industriais, uma vez que estes são gerados em grande volume e, quando não existem tecnologias de reaproveitamento ou coprocessamento disponíveis, tornam-se passivos ambientais, sendo destinados majoritariamente à aterros industriais. Pensando nisso, o presente trabalho objetivou o desenvolvimento de um material com características compatíveis com a lâ de vidro, por meio da reciclagem de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição, com o intuito de promover o reaproveitamento de três passivos ambientais gerados pelas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas do Vale do Paraíba. O material obtido apresentou composição química similar ao material de interesse (lã de vidro), assim como demonstrou possuir estrutura amorfa, não sendo registrada a ocorrência de picos cristalinos, por meio da aplicação de Difractometria de Raio X. Adicionalmente, observou-se que o material apresentou pouca perda de massa em sua Análise Termogravimétrica (TGA), bem como a sua Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) não apontou a ocorrência de eventos térmicos que possam indicar transição vítrea ou cristalização. Com base nos resultados obtidos, foi possível verificar que o material possui similaridade em relação ao material de interesse (lã de vidro) quando analisado sob a ótica dos ensaios de caracterização ora propostos.

**Palavras-chave:** Economia circular; passivo ambiental; reaproveitamento; lâ de vidro; simbiose industrial.

CECILIO, A. M. **Glass obtaining and characterization from recycling of steel slag, blast furnace slag and sand waste from casting and foundry.** 2023. Dissertation (Professional Master of Material) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2023.

## ABSTRACT

The solid waste management has become, as the years go by, one of the main environmental worries. It is currently the focus of many international conferences and specific regulations. Regarding this topic, there is a special worry related to the industrial wastes, since they are generated in huge volumes. When there is no reuse or co-processing technology available, they become environmental liabilities and are destined mostly to industrial landfills. Thinking about that, the present project had as objective the development of a material with characteristics compatible with glass wool, through recycling of steel slag, blast furnace slag and foundry sand residue, with the intention of promoting the reuse of three environmental liabilities generated by steel and metallurgical industries of the Paraíba Valley. The obtained material has presented chemical composition similar to the interest material (glass wool) and it also had amorphous structure. Additionally, the material showed little mass loss in its Thermogravimetric Analysis (TGA), and its Differential Scanning Calorimetry (DSC) did not indicate the occurrence of thermal events that could indicate glass transition or crystallization. With the obtained results, it is possible to verify that the material has similarity to the interest material (glass wool) when it has been analysed by the characterization tests proposed here.

**Keywords:** Circular economy; environmental liabilities; reuse; glass wool; industrial symbiosis.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Fluxograma - Geração de Escória de Aciaria LD .....	23
<b>Figura 2.</b> Fluxograma - Geração de Escória de Alto Forno .....	28
<b>Figura 3.</b> Fluxograma das Atividades Realizadas.....	41
<b>Figura 4.</b> Preparação de Amostras para Caracterização Química .....	43
<b>Figura 5.</b> Preparação do Material .....	46
<b>Figura 6.</b> Inspeção Visual – Ocorrência de Bolhas.....	51
<b>Figura 7.</b> Inspeção Visual – Formato das Amostras .....	52
<b>Figura 8.</b> Inspeção Visual – Formação de Fibras .....	53
<b>Figura 9.</b> Difractometria de Raio X – Lã de Vidro.....	56
<b>Figura 10.</b> Difractometria de Raio X – Vidro Reciclado .....	56
<b>Figura 11.</b> Análise Termogravimétrica (TGA) .....	57
<b>Figura 12.</b> DSC – Lã de Vidro.....	58
<b>Figura 13.</b> DSC – Vidro Reciclado.....	59
<b>Figura 14.</b> DRX – Lã de Vidro Calcinação.....	60

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Composição Química da Escória de Aciaria .....	24
<b>Tabela 2.</b> Propriedades Físicas da Escória de Aciaria.....	25
<b>Tabela 3.</b> Composição Química da Escória de Alto Forno .....	29
<b>Tabela 4.</b> Propriedades Físicas da Escória de Alto Forno .....	30
<b>Tabela 5.</b> Composição Química do Resíduo de Areia de Fundição.....	34
<b>Tabela 6.</b> Propriedades Físicas do Resíduo de Areia de Fundição .....	35
<b>Tabela 7.</b> Composição Química das Lãs de Vidro e Lã de Rocha.....	37
<b>Tabela 8.</b> Caracterização Química das Matérias-Primas.....	44
<b>Tabela 9.</b> Composição em Massa do Material .....	45
<b>Tabela 10.</b> Composição Química.....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
DRX	Difratometria de Raio X
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
FRX	Espectrometria por Fluorescência de Raio X
LD	Linz e Donawitz
OH	<i>Open Heart</i>
TGA	Análise Termogravimétrica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.1. Objetivo geral .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 ECONOMIA CIRCULAR.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.1. Escória de Aciaria.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1.1. Geração de Escória de Aciaria .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.1.2. Propriedades Gerais da Escória de Aciaria.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.1.3. Expansibilidade da Escória de Aciaria.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.1.4. Aplicações da Escória de Aciaria .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.2. Escória de Alto Forno.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2.1. Geração de Escória de Alto Forno .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2.2. Propriedades Gerais da Escória de Alto Forno.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2.3. Aplicações da Escória de Alto Forno.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.3. Resíduo de Areia de Fundição.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.3.1. Geração do Resíduo de Areia de Fundição .....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.3.2. Propriedades Gerais do Resíduo de Areia de Fundição .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.3.3. Aplicações do Resíduo de Areia de Fundição.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3 Lã Mineral .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.1.1. Produção de Lãs Minerai.....</b>	<b>36</b>

2.3.1.2. Composição Química das Lãs Minerais.....	37
2.3.1.3. Propriedades e Aplicações .....	38
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 MATERIAIS .....</b>	<b>39</b>
3.1.1. Escória de Aciaria.....	39
3.1.2. Escória de Alto Forno.....	40
3.1.3. Resíduo de Areia de Fundição.....	40
3.1.4. Lã de Vidro .....	40
<b>3.2 MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
3.2.1. Cálculo de Composição .....	41
3.2.2. Caracterização do Material.....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1 Inspeção Visual .....	51
4.2 Espectrometria Por Fluorescência De Raio X .....	54
4.3 Difractometria De Raio X.....	55
4.4 Análise Térmica Simultânea.....	57
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
<b>6 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>62</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O gerenciamento de resíduos sólidos tornou-se, com o passar dos anos, uma das principais preocupações ambientais, tendo sido foco de diversas conferências internacionais e regulamentações específicas, como é o caso da Lei nº 12.305, a qual instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

No que tange à esta temática, há uma preocupação especial em relação aos resíduos industriais, uma vez que estes são gerados em grande volume e, quando não existem tecnologias de reaproveitamento ou coprocessamento disponíveis, tornam-se passivos ambientais, sendo destinados majoritariamente à aterros industriais.

Em regiões com economia fortemente marcada pela influência da indústria, como é o caso do Vale do Paraíba, este fator é ainda mais nítido. Nesta região, a presença ativa de indústrias siderúrgicas e metalúrgicas traz à tona a existência de alguns passivos ambientais desafiadores, como é o caso da escória de aciaria, da escória de alto forno e do resíduo de fundição.

Com o objetivo de superar este atual cenário, é observado um grande engajamento da comunidade científica em busca de novos materiais e/ou tecnologias para reaproveitamento, reciclagem ou coprocessamento de tais resíduos.

No que tange ao resíduo de escória de aciaria e de alto forno, inúmeras são as possibilidades de reaproveitamento em estudo, tendo sido identificada a viabilidade de utilização do mesmo como agregado miúdo em argamassa e misturas betuminosas, por exemplo. Ao mesmo passo, o resíduo de areia de fundição já foi utilizado para produção de misturas asfálticas e blocos de concreto, dentre outras aplicações que sempre tinham em foco a redução dos impactos de tais passivos ambientais por meio da promoção de uma alternativa de pós-uso que viabilizasse a melhoria no ciclo de vida do produto (SILVA *et al.*, 2019; FREIRE; MAIA, 2019; GARCIA *et al.*, 2018; GHISLENI; LIMA, 2020).

Apesar de todos os esforços empreendidos, as soluções propostas até então não foram capazes de atender à demanda industrial da região do Vale do Paraíba. No que tange à escória de aciaria e de alto forno, por exemplo, apesar de existirem possibilidades tecnológicas para o seu coprocessamento, o passivo atualmente existente nesta região possui volume de geração muito superior à capacidade de absorção do mercado, em especial, das indústrias cimenteiras.

Quanto ao resíduo de areia de fundição, apesar do engajamento científico e industrial em busca de soluções inovadoras, ainda não há uma tecnologia financeiramente adequada para o reaproveitamento deste resíduo no Vale do Paraíba, sendo este totalmente destinado à aterros industriais.

## 1.2.OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

O presente trabalho possui como objetivo principal fomentar o desenvolvimento de um vidro com características compatíveis à lâ de vidro, por meio da reciclagem de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição, com o intuito de promover o reaproveitamento de três relevantes passivos ambientais gerados pelas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas do Vale do Paraíba.

### 1.2.2. Objetivos específicos

O presente estudo apresenta os objetivos específicos abaixo relacionados:

- Caracterizar o material desenvolvido comparativamente ao material de referência no mercado para isolamento termo-acústico (lã de vidro);
- Determinar a composição química do material por espectrometria de fluorescência de raio-x;
- Verificar o estado amorfo do material por meio da aplicação de difratometria de raio x;

- Avaliar o comportamento endotérmico e exotérmico das amostras por meio da aplicação de análise térmica (TGA/DSC).

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Alinhado com as grandes preocupações ambientais, o presente estudo coopera com o desenvolvimento de tecnologias para reciclagem e coprocessamento de resíduos industriais e possui como justificativa principal a transformação de três passivos ambientais da região do Vale do Paraíba em um material de relevante importância pro mercado da construção civil, contribuindo para a obtenção de conforto térmico e acústico em edificações comerciais e residenciais.

Desta maneira, o presente estudo atua de maneira direta para fomento da Economia Circular, através da substituição do conceito de fim de vida proposto pela economia linear por um novo fluxo circular de reutilização, dando um novo uso à passivos ambientais das indústrias siderúrgicas e metalúrgicas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ECONOMIA CIRCULAR

As preocupações ambientais são cada vez mais constantes em nossa sociedade moderna, onde o consumismo impulsiona a utilização inconsequente de recursos naturais e, ao mesmo passo, a obsolescência programada contribui para uma redução significativa do ciclo de vida dos produtos (SEHNEM; PEREIRA, 2019).

Este cenário retrata a urgente necessidade de desenvolvimento de modelos de produção mais sustentáveis, quer seja pelo prolongamento da vida útil do produto final ou pela reincorporação do resíduo gerado à cadeia produtiva por meio da adoção de um sistema de Economia Circular, o qual substitui a visão de fim de vida estabelecida pela chamada economia linear, através da indicação de novos fluxos circulares para reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energias (BARBOZA *et al.*, 2019).

De certa maneira, pode-se dizer que esta visão se inspira nos mecanismos dos ecossistemas naturais, como é o caso do ciclo da água e do carbono, por exemplo, nos quais a geração de recursos ocorre em um processo contínuo de reabsorção e reciclagem (SEHNEM; PEREIRA, 2019).

Levando isso em consideração, pode-se dizer que a adoção da Economia Circular torna a cadeia produtiva mais sustentável, uma vez que atende a todos os três pilares da sustentabilidade, sendo estes (BARBOZA *et al.*, 2019):

- **Pilar Ambiental:** As estratégias promovidas pela Economia Circular trazem inúmeros benefícios ambientais, desde a redução do processo de extração acelerada de recursos naturais, minimização do volume de resíduos sólidos e efluentes gerados, bem como a otimização do consumo de energia.
- **Pilar Social:** A Economia Circular torna possível a geração de empregos e renda. Adicionalmente, os benefícios ambientais obtidos interferem diretamente na comunidade no entorno, por meio da promoção de uma maior qualidade do ar, água e solo.

- **Pilar Econômico:** Financeiramente, a adoção da Economia Circular atrai bastantes empresas, uma vez que possibilita a otimização do processo de comercialização de resíduos, trazendo maior rendimento econômico. Adicionalmente, ainda há a possibilidade de utilização de tal recurso para desenvolvimento de campanhas de *marketing* verde, as quais podem contribuir para uma maior visibilidade perante ao mercado.

Apesar de tantas vantagens, é necessário compreender que ainda existem muitos desafios a serem enfrentados para o desenvolvimento adequado da Economia Circular no Brasil, como é o caso da baixa adesão e funcionamento inadequado da coleta seletiva, bem como os custos associados à segregação posterior de resíduos, o que dificulta a sua reintegração no processo. Adicionalmente, ainda é observada pouca aceitação de produtos reciclados por parte de consumidores finais, bem como falta de investimentos e incentivos políticos, associados à uma tributação excessiva, o que, muitas vezes desestimula o desenvolvimento de políticas ambientais por parte do empreendedor brasileiro (CONSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2020).

Mesmo com todas estas barreiras, pode-se dizer que o desenvolvimento de uma Economia Circular é favorecido em grandes centros industriais, uma vez que é possível garantir maior interação e cooperação entre as organizações existentes, otimizando o fluxo de bens e serviços e reduzindo de maneira evidente os custos associados (OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2019). Na Europa, esta união é incentivada pelo Plano de Ação da União Europeia para a Economia Circular, o qual indica a necessidade de estimular a simbiose industrial, permitindo que os resíduos de uma empresa possam servir de insumos para outra (EUROPEAN COMMISSION, 2015).

No caso da região do Vale do Paraíba, a existência de um polo siderúrgico e metalúrgico torna possível o favorecimento da Economia Circular, desde que as empresas associadas invistam massivamente no fortalecimento de ações internas e externas para o estreitamento de sua relação com seus *stakeholders* e desenvolvimento de parcerias, de modo a unir suas forças para favorecer-se de todas as vantagens associadas (SEHNEM; PEREIRA, 2019).

## 2.2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Muitos foram os reflexos da Revolução Industrial e do desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos anos. Este processo resultou em mudanças significativas à vida humana, aumentando a capacidade de produção, favorecendo a geração de renda e avançando de maneira intensificada os setores de transporte, comunicação e saúde, promovendo maior qualidade de vida (ROCHA, LIMA; WALDMAN, 2020).

De fato, é impossível imaginar a sociedade moderna sem a existência da cadeia industrial, uma vez que esta movimenta uma grande parcela da economia mundial. Apesar disso, deve-se dizer que todo o progresso traz consigo certo ônus. Neste caso específico, pode-se dizer que a industrialização intensificou a escassez de recursos naturais e degradação do meio ambiente, culminando em problemas ambientais de grandes proporções, como é o caso da poluição do solo, hídrica, acústica e atmosférica, por exemplo (ROCHA, LIMA; WALDMAN, 2020).

Dentre tantos aspectos ambientais associados ao setor produtivo, a geração de resíduos industriais tem sido o foco de inúmeros debates internacionais e regulamentações específicas, dado o seu elevado potencial poluidor. Em geral, pode-se classificar os resíduos industriais como as sobras ou saídas do processo produtivo, muitas vezes com composição mista e variável, que dependem de destinação adequada para minimizar ou eliminar os impactos ambientais associados (AWUCHI *et al*, 2020).

A preocupação com os resíduos industriais é considerada uma responsabilidade dos empreendedores, uma vez que o não atendimento às medidas de disposição podem culminar em implicações legais ou afetar diretamente a sua imagem perante o mercado (BRASIL, 2010).

Muito mais do que atendimento legal, as empresas que investem em uma Economia Circular compreendem a importância de repensar a sua relação com seus resíduos, uma vez que isso possibilita diversas vantagens competitivas, seja por meio da maximização dos lucros de comercialização ou pela análise e redução de perdas de processos (SEHNEM; PEREIRA, 2019).

### 2.2.1. Escória de Aciaria

Durante muitos anos, a escória de aciaria foi classificada como um dos mais importantes resíduos sólidos da siderurgia. Entretanto, após o desenvolvimento de alguns estudos científicos que comprovavam a possibilidade de reincorporação e reciclagem deste material, alguns países passaram a definir a escória como um coproduto, valorizando desta maneira o seu potencial de mercado (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

#### 2.2.1.1. Geração de Escória de Aciaria

Em geral, pode-se dizer que a escória de aciaria é um dos principais subprodutos da siderurgia, atuando como uma etapa essencial do processo, uma vez que garante a remoção de elementos deletérios e impurezas do aço, exercendo papel fundamental para o controle de qualidade do produto final (AMANCIO *et al.*, 2020).

A escória de aciaria é gerada durante o processo de refino primário do aço, no qual a matéria-prima sólida ou líquida é transformada em um produto base, considerando a adição de calcário, dolomita ou qualquer outro material auxiliar. O processo pode ocorrer de três maneiras diferentes, a depender do tipo de forno de refino utilizado, sendo estes, o Siemens-Martin (*Open Heart* – OH); conversor (Linz e Donawitz – LD ou *Basic Oxygen Furnace* – BOF) e forno elétrico a arco (*Electric Arc Furnace* – EAF) (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

No Brasil, até o terceiro trimestre de 2020, apenas 23,4% da produção da no país ocorria pelo processo EAF, enquanto 76,6% era representado pelos processos LD/BOF (IABr, 2020).

Em ambos os casos, é realizada a adição da carga metálica e seus respectivos fundentes (cal calcítica, cal dolomítica, fluorita, minério de ferro, entre outros), os quais são responsáveis pelo balanço térmico da mistura, sendo essenciais para a formação da escória. Posteriormente, é realizada a injeção de oxigênio de alta pureza, o qual é responsável pela oxidação do carbono, silício, enxofre, fósforo e manganês, gerando a chamada escória oxidante (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

Ao final desta etapa, o aço é separado da escória sobrenadante por diferença de densidade (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

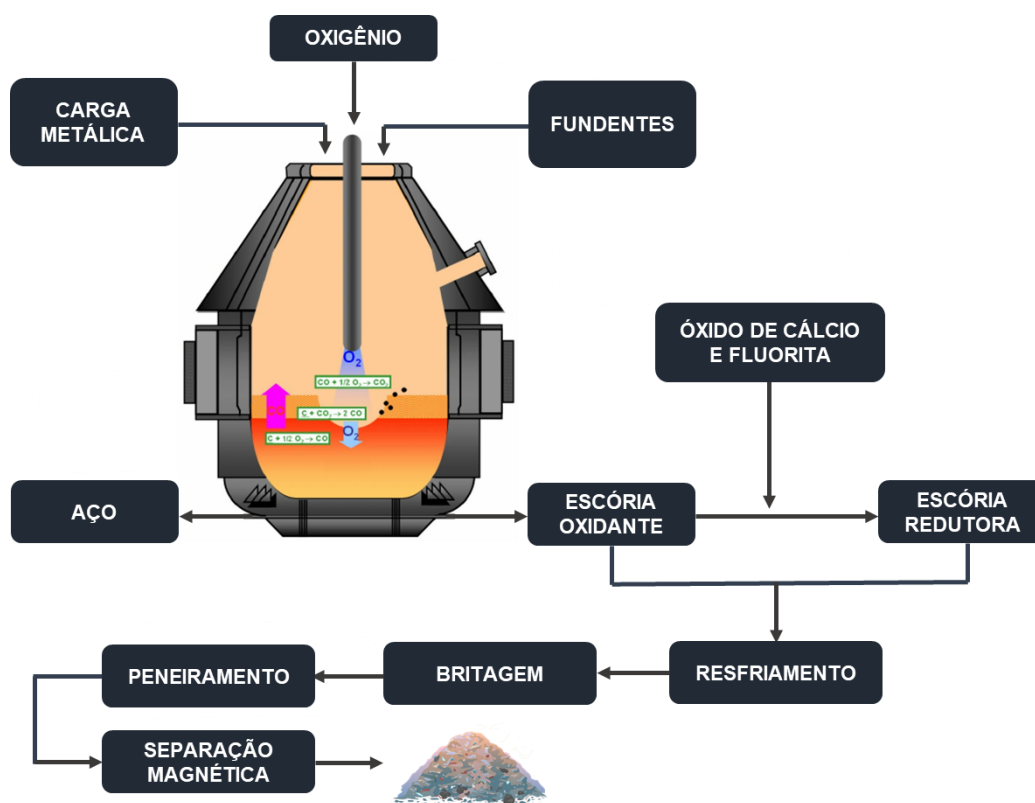
Após a sua formação, o material pode ser resfriado por aspersão de água ou ar, com o intuito de reduzir a sua granulometria. Cabe ressaltar que este processo gera uma distribuição variada de grãos, fazendo com que o material de maior diâmetro possua uma estrutura mais porosa e parcialmente cristalina, enquanto os de diâmetros reduzidos, adotam composição vítrea (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

Após esta etapa de resfriamento, a escória de aciaria pode passar por uma etapa de britagem, peneiramento e separação magnética, na qual ocorre a recuperação do ferro. Ao final deste procedimento, o material é armazenado em pilhas assentadas em pátios de estocagem a céu aberto (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

Esta é uma etapa crucial, uma vez que é responsável por controlar a instabilidade volumétrica do material, a qual é gerada por conta da presença de óxidos potencialmente hidratáveis. Durante este período de cura, os óxidos livres são hidratados, com o objetivo de acelerar a expansão volumétrica e obter um material estável (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

O processo de geração e beneficiamento de escória de aciaria pode ser resumido, conforme o fluxograma indicado na Figura 1.

**Figura 1.** Fluxograma - Geração de Escória de Aciaria LD



Fonte: Autor (2023)

Estima-se que a produção de escória de aciaria corresponda a 10 a 15% da produção total de aço, podendo este volume ser maior ou menor em virtude das matérias-primas e do tipo de processo adotado (USGS, 2020).

### 2.2.1.2. Propriedades Gerais da Escória de Aciaria

Quimicamente, a escória de aciaria possui composição bastante variada, a depender da matéria-prima, tipo de forno adotado, especificação do aço e qualidade do controle do processo produtivo. Entretanto, pode-se prever que durante o processo de produção ocorre a eliminação do óxido de cálcio e íons de alumínio, silício e fósforo, os quais acabam migrando para a escória de aciaria (JIANLONG; YANPING; MIN, 2018).

A Tabela 1 apresenta a composição química de amostras de escória de aciaria LD utilizadas em diferentes pesquisas. Por meio de uma avaliação dos resultados obtidos em tais estudos, é possível comprovar a variabilidade de composição do material em questão, o que dificulta o desenvolvimento de trabalhos visando a incorporação da escória em diferentes produtos.

**Tabela 1.** Composição Química da Escória de Aciaria

Composição Química (%)	MOURA et. al.	PEREIRA, RAMOS & SILVA	SAKAR, BASU & SAMANTA	PALOD, DEO & RAMTEKKAR	AMANCIO et. al.	COSTA et. al.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9	1,5	1,1	1,4	0,6	4,4
SiO <sub>2</sub>	12,7	10,6	10,0	15,9	5,8	11,8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,3	-	1,5	1,8	1,0	-
CaO	43,4	51,5	55,1	46,0	33,5	25,7
MnO	3,2	2,5	-	1,3	5,0	6,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,4	25,6	27,7	17,0	52,9	43,3
SO <sub>3</sub>	0,16	0,21	-	-	-	-
MgO	5	3,7	1,8	6,7	-	4,2

Fonte: Adaptado de MOURA et. al, 2019; PEREIRA; RAMOS; SILVA, 2020; SAKAR; BASU; SAMANTA, 2017; PALOD; DEO; RAMTEKKAR, 2020; AMANCIO et. al., 2020; COSTA et. al., 2019.

Adicionalmente, a escória de aciaria é classificada como um resíduo granular, com moderado índice de absorção de água devido à sua superfície porosa que, somada com a presença de óxidos hidratáveis, culmina na instabilidade volumétrica (FREITAS,2018).

As características físicas da escória de aciaria, assim como a sua composição química, variam de acordo com a matéria-prima utilizada, metodologia processamento e beneficiamento. A Tabela 2 apresenta um comparativo das propriedades físicas estudadas por diferentes autores.

**Tabela 2.** Propriedades Físicas da Escória de Aciaria

Propriedade	CANAL, ROSÁRIO & PIRES	BARRETO et. al.	AMANCIO et. al.
Massa Específica Aparente	3333 kg/m <sup>3</sup>	3440 kg/m <sup>3</sup>	3860 kg/m <sup>3</sup>
Absorção de Água	0,86%	1,66 %	2,10%
Porosidade Aparente	2,72%	0,87 %	-

Fonte: Adaptado de CANAL; ROSÁRIO; PIRES, 2020; BARRETO et. al., 201; AMANCIO et. al., 2020.

Em relação à sua mineralogia, as fases presentes na escória resfriada são muito variáveis, dependendo do processo de produção do aço e da metodologia de resfriamento aplicada. Entretanto, pode-se dizer que as principais fases minerais presentes da escória são o silicato dicálcico, a ferrita dicálcica e a wustita. Além destas fases, também é comumente observada a presença de olivina, mervitina, silicato tricálcico, brown millerita, óxido de cálcio livre e óxido de magnésio livre (ALVES,2008).

### 2.2.1.3. Expansibilidade da Escória de Aciaria

Devida a elevada instabilidade volumétrica, existe uma grande dificuldade relacionada à utilização de escória de aciaria, o que, em muitas vezes, inviabiliza a sua utilização na construção civil, provocando deterioração prematura de pavimentos, formando fissuras (ALVES,2008).

Este processo de expansibilidade ocorre em virtude de diversos mecanismos, como é o caso da hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres, carbonatação do Ca(OH)<sub>2</sub>, desintegração do material em virtude da transformação de fase do silicato dicálcico e oxidação ou corrosão do ferro metálico, por exemplo (FREITAS, 2018).

Devido à esta instabilidade volumétrica, a escória de aciaria deve ser armazenada em pátios de estocagem abertos, onde o ar e a água reagem com os óxidos de cálcio e magnésio livres, transformando-os em hidratos estáveis. Ao mesmo passo, o material passa por um processo de corrosão e oxidação, os quais são essenciais para atingir a estabilidade (FREITAS, 2018).

Este processo de cura requer uma área de extensa, culminando em despesas consideráveis, as quais variam entre US\$ 20 a US\$ 30 por tonelada de resíduo depositado. Só em 2019, a produção mundial de escória de aciaria foi de 190 a 280 milhões de toneladas, sendo o seu maior volume destinado à grandes pátios de estocagem (FREITAS, 2018; USGS, 2020).

#### 2.2.1.4. Aplicações da Escória de Aciaria

Dado ao grande volume de geração e despesas associadas, as tecnologias para reaproveitamento e reciclagem de escória de aciaria têm ocupado espaço de suma importância na comunidade científica. De modo geral, pode-se dizer que são inúmeras as aplicações propostas para este resíduo, o qual, majoritariamente tem sido utilizado para produção de concreto e misturas voltadas para engenharia rodoviária (DIAS *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2018).

A utilização da escória de aciaria na formulação de argamassa é um tema muito recorrente, entretanto, estudos demonstram que a utilização deste agregado resulta em um maior módulo de elasticidade dinâmico, o que propicia certa redução da vida útil do revestimento, inviabilizando por ora este tipo de aplicação (AMANCIO *et. al.*, 2020).

Outras iniciativas para reaproveito deste resíduo envolvem o desenvolvimento de geopolímeros sustentáveis, fabricação de tijolos ecológicos, correção agrícola para solos, entre outras (PEREIRA; RAMOS; SILVA, 2020; SOUZA *et. al.*, 2019; OLIVEIRA *et. al.*, 2020).

O reaproveitamento de escória para fabricação de isolantes termo acústicos é ainda uma aplicação em estágio inicial de desenvolvimento. Em especial, foi

observada que a sua utilização, agregada ao resíduo de corte de granito para produção de lâ de rocha demonstra grande eficiência (ALVES, 2008).

### **2.2.2. Escória de Alto Forno**

Assim como a escória de aciaria, a escória de alto forno foi considerada por muitos anos como um dos maiores desafios da metalurgia e siderurgia, dado ao seu elevado volume de geração. Entretanto, após o desenvolvimento de alguns estudos científicos que comprovavam a possibilidade de reincorporação e reciclagem deste material, a indústria passou a enxergar este material como um importante coproduto, valorizando o seu potencial de mercado, que é hoje reconhecido em todo o mundo (PIMENTEL et. al., 2019).

#### **2.2.2.1. Geração de Escória de Alto Forno**

A escória de alto forno é um importante coproduto gerado no processo de produção de ferro gusa, durante o qual, as impurezas do minério de ferro, calcário, dolomita, cinzas de carvão e de outras matérias-primas e insumos se combinam. Esta etapa é crucial para o controle de qualidade do metal, uma vez que a formação da escória culmina na eliminação de elementos deletérios, garantindo maior performance do produto final (MOURA et. al., 2019).

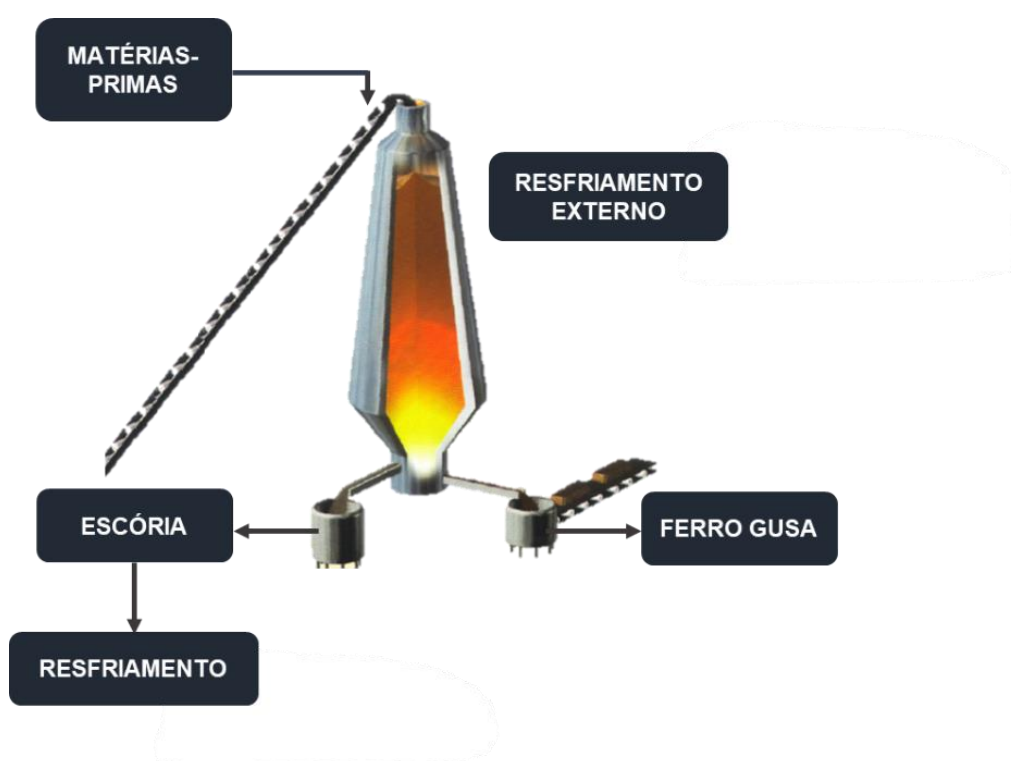
Durante a fabricação do ferro gusa nos altos fornos, as impurezas das matérias-primas se combinam, formando a escória de alto forno que, por conta de sua insolubilidade e menor densidade, sobrenada no ferro gusa, protegendo este de uma possível reoxidação. Este material também é responsável pela absorção de grande percentual de enxofre proveniente da carga, compreendendo aproximadamente 20% da massa de gusa produzido (FHART, 2016).

Ao final do processo, a escória é segregada do metal e passa por um processo de resfriamento, o qual pode ser efetuado de duas maneiras diferentes. A escória de alto forno pode ser resfriada rapidamente por meio da aplicação de jatos de água, culminando em uma geometria granular, amorfa e elevada reatividade. Ao mesmo

passo, este material pode passar por um processo mais lento de resfriamento a ar, o que culmina na formação de material cristalino não reativo, sendo mais aplicado como agregado inerte em pavimentação de estradas (FHART, 2016).

O processo de geração e beneficiamento de escória de alto forno pode ser resumido, conforme o fluxograma indicado na Figura 2.

**Figura 2.** Fluxograma - Geração de Escória de Alto Forno



Fonte: Autor (2023)

#### 2.2.2.2. Propriedades Gerais da Escória de Alto Forno

Em geral, pode-se dizer que a escória de alto forno possui composição química bastante variada, a depender da matéria-prima, estado de pureza do material, método de resfriamento e qualidade do controle do processo produtivo. Entretanto, pode-se prever que durante o processo de produção ocorre a eliminação do carbono, óxido de

cálcio e íons de alumínio, silício e magnésio, os quais acabam migrando para a escória de alto forno (FHART, 2016).

A Tabela 3 apresenta a composição química de amostras de escória de alto forno utilizadas em diferentes pesquisas.

**Tabela 3.** Composição Química da Escória de Alto Forno

Composição Química (%)	LANGARO et. al.		CECHIN et. al.	MICHIANSKI & SANTOS	COSTA et. al.	
SiO <sub>2</sub>	38,1	32,2	39,7	33,0	39,4	40,2
CaO	37,0	49,5	32,8	3,5	31,5	36,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,9	8,2	12,9	16,2	12,6	10,6
MgO	6,2	5,0	7,2	1,0	5,3	4,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3	0,8	2,6	29,5	2,3	3,8
MnO	1,1	1,3	0,6	5,9	5,1	1,5
K <sub>2</sub> O	0,9	0,5	0,7	1,4	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,8	0,6	0,7	3,0	-	-
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,1	0,1	1,1	-	-
SrO	0,1	0,2	0,1	-	-	-
SO <sub>3</sub>	0,1	1,4	0,1	-	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	0,1	0,1	-	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	4,4	-	-
ZnO	-	-	-	0,5	-	-
NiO	-	-	-	0,3	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0,3	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0,2	-	-

Fonte: Adaptado de LANGARO et. al., 2017; CECHIN et. al., 2018 ; MICHIANSKI ; SANTOS, 2019 ; COSTA et. al., 2019.

Apesar de serem observadas variações entre composições químicas de escórias geradas de diferentes fontes, em geral, quando se trata de uma fonte de

geração específica, a composição é bastante constante, devendo ser seriamente observada, uma vez que oscilações de composição podem indicar desvios de energia e custos adicionais (FHART, 2016).

As características físicas da escória de alto forno, assim como a sua composição química, variam de acordo com a matéria-prima utilizada, metodologia processamento e resfriamento. A Tabela 4 apresenta um comparativo das propriedades físicas estudadas por diferentes autores.

**Tabela 4.** Propriedades Físicas da Escória de Alto Forno

Propriedade	PIMENTEL et. al.	COSTA et. al.	
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	3060	2540	2870
Índice de Vazios	47,71	49	65

Fonte: Adaptado de PIMENTEL et. al., 2018; COSTA et. al., 2019.

Em relação à sua mineralogia, as fases presentes na escória resfriada são muito variáveis, dependendo do processo de produção e, principalmente, da metodologia de resfriamento aplicada. Entretanto, pode-se dizer que as principais fases minerais presentes da escória são quartzo, calcita e hematita. Adicionalmente, pode ser identificada a presença de gehlenita, akermanita, merwinita, monticelita, wollastonita, entre outros componentes mineralógicos (PIMENTEL et. al., 2019; COSTA; CHOQUE FERNANDEZ; SOUZA, 2019).

#### 2.2.2.3. Aplicações da Escória de Alto Forno

A escória de alto forno é amplamente utilizada para fabricação de cimento, devido a sua hidraulicidade. Adicionalmente, é muito comum a utilização deste coproduto em terraplanagens, obras rodoviárias e lastros ferroviários (FHART, 2016).

Algumas iniciativas, entretanto, estão sendo realizadas para desenvolvimento de outras fontes de reaproveitamento de escória de alto forno. Estudos demonstram a possibilidade de aplicação deste coproduto como fertilizantes para o setor de agronegócios e na fabricação de tijolos ecológicos, por exemplo (SOUSA; CHOQUE FERNANDEZ; COSTA, 2019; SOUZA et. al., 2018).

### **2.2.3. Resíduo de Areia de Fundição**

A areia de fundição é um grande desafio a ser enfrentado, uma vez que se trata de um dos resíduos sólidos mais produzidos no Brasil, sendo inerente ao processo de moldagem de peças metálicas em grande escala por indústrias do ramo metalúrgico. O seu reaproveitamento já tem sido abordado em alguns estudos desenvolvidos pela comunidade científica, entretanto, ainda há muito a se percorrer para que haja de fato a valoração deste material (LUVIZÃO et. al., 2019).

#### **2.2.3.1. Geração do Resíduo de Areia de Fundição**

O processo de fundição nada mais é do que a moldagem de um metal ou liga metálica por meio de seu vazamento em um molde com formato e medidas correspondentes aos das peças a serem produzidas. Neste processo são utilizadas caixas de contenção, as quais se tratam de estruturas quadradas, nas quais posiciona-se uma peça protótipo previamente fabricada, constituída por cera, resina ou material volátil à temperatura de fusão. Posteriormente, os espaços vazios entre a caixa e esta peça são preenchidos por areia saturada de aglutinantes, a qual passa por um processo de compactação para formação do molde. O ferro fundido é então vazado e, após o seu resfriamento, o molde de areia é quebrado e a peça metálica é obtida (DYER et. al., 2021).

Segundo a Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), apenas em 2020 o Brasil produziu 2.073.172 toneladas de ferro fundido. Desta produção, estima-se que 22% foram convertidos em resíduo de areia de fundição, culminando na geração de

456.097 toneladas deste material, o qual, em sua maioria, é destinado para aterros industriais e áreas de armazenamento provisório (ABIFA, 2020).

O resíduo de areia de fundição é gerado no processo de moldagem de peças metálicas, o qual pode ser realizado de maneiras distintas, a depender da matéria-prima utilizada para confecção dos moldes, que podem ser hidrofílicos ou hidrofóbicos (DYER et. al., 2021):

- **Areia Verde:** Técnica considerada mais comum para moldagem de peças, dado ao seu baixo custo e facilidade de preparo. Neste processo, são utilizados moldes confeccionados à base de areia de sílica, bentonita, pó de carvão, amido de milho e água. Apesar de todas as vantagens associadas, a utilização de areia verde pode influenciar na qualidade das peças, uma vez que a areia natural possui heterogeneidade granulométrica, podendo resultar em elevada rugosidade das peças fundidas e maior erosão do molde utilizado (CASALI et. al., 2018).
- **Alcalino Fenólica:** Neste processo de moldagem, a areia é saturada com resina fenólica uretânica, sendo curada a frio por meio da utilização de um catalisador (DYER et. al., 2021).
- **Furânica:** Neste processo, a areia é saturada com resina furânica, sendo curada a frio por meio da utilização de um catalisador (DYER et. al., 2021).
- **Shell Molding:** Neste processo, são utilizados moldes compostos por areia de sílica, resina e catalisador. Após a alocação do material na caixa de contenção, é necessário realizar um processo de vibração para melhor aglomeração do material. Após esta etapa, é observada a formação de uma casca superficial, a qual deve ser removida (CASALI et. al., 2018).
- **Silicato de Sódio:** Neste processo de moldagem, utiliza-se areia e silicato de sódio para fabricação dos moldes. Após a vibro-compactação, a mistura recebe gás carbônico, com o intuito de garantir a formação de pontes químicas entres os grãos (DYER et. al., 2021).

Após a sua utilização, a areia de fundição costuma ser recirculada e reutilizada várias vezes durante o processo de fundição, sendo necessária a adoção de um sistema de tratamento mecânico por peneiramento, de modo a remover as partículas aglutinadas. Adicionalmente, é requerido um tratamento térmico para remoção de resinas e óleos. Este processo é repetido diversas vezes até que o material apresente sinais de perda de suas propriedades físico-químicas, o que inviabiliza o seu aproveitamento no processo, gerando, desta maneira, o chamado resíduo de areia de fundição (COMPARSI et. al., 2020).

#### 2.2.3.2. Propriedades Gerais do Resíduo de Areia de Fundição

Em geral, pode-se dizer que o resíduo de areia de fundição possui composição química bastante variada, a depender da matéria-prima utilizada para fabricação do molde (DYER et. al., 2021).

A Tabela 5 apresenta a composição química de amostras de resíduo de areia de fundição utilizadas em diferentes pesquisas. Pode-se observar a presença de sílica em alta concentração, a qual é esperada, uma vez que o material utilizado na confecção dos moldes das peças fundidas possui como matéria-prima básica areia rica em sílica.

**Tabela 5.** Composição Química do Resíduo de Areia de Fundição

Composição Química (%)	CASALI et. al.	SILVA et. al.	MARTIN, SCHABBACH e FOLGUERAS		
SiO <sub>2</sub>	95,29	95,40	85,95	85,05	85,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,08	0,60	9,35	9,70	9,59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38	1,00	1,11	1,11	1,16
CaO	0,11	0,20	0,43	0,42	0,43
K <sub>2</sub> O	0,11	0,10	0,79	0,78	0,79
MgO	0,17	0,10	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	0,37	0,10	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	<0,10	-	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,05	<0,10	0,38	0,38	0,38
SO <sub>3</sub>	-	<0,10	1,38	1,25	1,15
ZrO <sub>2</sub>	-	<0,10	-	-	-
SrO	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de CASALI et. al., 2018; SILVA et. al., 2020; MARTIN, SCHABBACH; FOLGUERAS,2019

As características físicas do resíduo de areia de fundição, assim como a sua composição química, variam de acordo com a matéria-prima utilizada. A Tabela 6 apresenta um comparativo das propriedades físicas estudadas por diferentes autores.

**Tabela 6.** Propriedades Físicas do Resíduo de Areia de Fundição

Propriedade	CASALI et. al.	DYER et. al.	
Massa Específica Aparente	2,62 g/cm <sup>3</sup>	1,87 gm/cm <sup>3</sup>	2,07 g/cm <sup>3</sup>
Massa Unitária	1,36 g/cm <sup>3</sup>	1,40 g/cm <sup>3</sup>	1,31 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado de CASALI et. al., 2018; DYER et. al., 2021.

### 2.2.3.3. Aplicações do Resíduo de Areia de Fundição

O reaproveitamento do resíduo de areia de fundição tem sido estudado de maneira intensificada pela comunidade científica, tendo sido avaliada a possibilidade de incorporação deste em produtos à base de cimento Portland, como é o caso de argamassa e concretos (CASALI et. al., 2018; LERMEN, BONATTO, SILVA, 2020).

Alguns estudos comprovam a viabilidade de utilização de resíduo de areia de fundição em misturas asfálticas, proporcionando aumento da resistência a tração e melhor desempenho no ensaio de dano por umidade induzida (GARCIA et. al., 2018; LUVIZÃO et. al., 2019).

Adicionalmente, alguns estudos mais disruptivos tem sido realizados com o intuito de fomentar o desenvolvimento de geopolímeros à base deste resíduo (COMPARSI, 2020).

Apesar de todo engajamento da comunidade científica, ainda não há uma alternativa economicamente viável para o reaproveitamento deste resíduo na região do Vale do Paraíba, o que dificulta o processo de valorização da areia de fundição, gerando passivos ambientais de difícil reparação (DYER et. al., 2021).

## 2.3 LÃ MINERAL

As lãs minerais são compostas por um conjunto de fibras amorfas de silicato, que possuem importantes propriedades, garantindo isolamento acústico, isolamento térmico e proteção contra fogo. Devido à estas características, o material é considerado extremamente versátil, podendo ser utilizado em diversas aplicações, como no mercado de construção civil, transportes e indústrias, por exemplo (AFELMA, 2015).

As lãs minerais mais comumente encontradas no mercado são as lãs de vidro e de rocha. Ambos os materiais possuem estrutura vítrea e grande capacidade de absorver diversos elementos, sendo ótimas alternativas para o reaproveitamento de escórias complexas e outros resíduos (ALVES, 2008).

### 2.3.1.1. Produção de Lãs Minerais

O processo produtivo dos diferentes tipos de lâ mineral é extremamente similar, variando apenas alguns parâmetros especialmente afetados pela matéria-prima utilizada. No caso das lãs de rocha, como o próprio nome diz, o mesmo utiliza como principal matéria-prima as rochas basálticas, recebendo alguns aditivos, como é o caso de areia, calcário e outros componentes, os quais possuem a função de efetuar a correção da composição química final. A lâ de vidro, por sua vez, é produzida a partir de vidro borossilicato, areia, barrilha, calcário, feldspato e outros aditivos (ALVES, 2008).

Após o recebimento e dosagem as matérias primas, é realizada a fusão do material à elevadas temperaturas (1400 a 1500°C), ocorrendo posteriormente a etapa de formação das fibras, por meio da ejeção do material fundido por pequenos orifícios sobre um disco giratório de metal, o qual promove o resfriamento brusco do material. Finalizada esta etapa, o material pode receber algum tipo de ligante por *Melt Spinning*, caso seja necessário para sua aplicação, sendo necessário submeter o mesmo a um processo de aquecimento em uma estufa de cura (ALVES, 2008).

Finalizada a etapa de processamento do material, a lã mineral é devidamente moldada, conforme dimensões especificadas para o produto, sendo posteriormente enviada para uma etapa de embalagem e expedição (ALVES, 2008).

### 2.3.1.2. Composição Química das Lãs Minerais

A Tabela 7 apresenta a composição química de amostras de lã de vidro e lã de rocha. Embora, hajam diferenças quanto às formulações, pode-se observar que a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é o principal componente de ambos os materiais.

**Tabela 7.** Composição Química das Lãs de Vidro e Lã de Rocha

Composição Química (%)	Lã de Vidro	Lã de Rocha
CaO	7,9	18,2
SiO <sub>2</sub>	61,3	39,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,0	15,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,4	9,8
Na <sub>2</sub> O	16,3	1,3
K <sub>2</sub> O	1,0	0,5
MgO	2,0	11,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,2	0,1
TiO <sub>2</sub>	0,1	1,0
SO <sub>3</sub>	2,0	0,1
Cl	0,1	0,0

Fonte: Adaptado de YLINIEMI et. al., 2019

### 2.3.1.3. Propriedades e Aplicações

As lãs minerais apresentam excelentes propriedades para isolamento térmico e acústico, uma vez que podem ser utilizadas na construção de barreiras, de modo a evitar a transferência de uma onda sonora de um ambiente para outro. Adicionalmente, as lãs minerais podem ser aplicadas para a aumentar a absorção acústica de ambientes em estúdios de gravadoras, por exemplo. Isso apenas é possível, uma vez que as ondas sonoras são facilmente absorvidas, devido à elevada porosidade do material. Além disso, ocorre uma fricção entre a onda e a superfície das fibras, fazendo com que parte da energia sonora seja convertida em calor (ALVES, 2008).

Ao mesmo tempo, estes materiais não propagam chamas, são imputrescíveis e não são atacados por insetos e roedores, sendo ideais para aplicações domésticas e comerciais (BORGES et. al., 2017).

Pode-se dizer ainda que as lãs minerais são dimensionalmente estáveis, mesmo à altas temperaturas, bem como não absorvem umidade ou sofrem danos estruturais, sendo excelentes alternativas para revestimento de equipamentos. Adicionalmente, estes materiais não atacam superfícies com as quais venham a entrar em contato e não depositam quando submetidos a vibrações (BORGES et. al., 2017).

Quanto à sua aplicação, as lãs minerais apresentam fácil instalação e não exigem capacitação técnica para fazê-lo. Adicionalmente, por não quebrarem facilmente, acabam por contribuir com a redução das perdas em obras (ALVES, 2008).

Por conta de todas estas excelentes propriedades, as lãs minerais são consagradas no mercado de isolamento termo acústico, ganhando cada vez mais importância comercial (BORGES et. al., 2017).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foi considerada a utilização de amostras de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição, materiais estes que funcionaram como matéria-prima para formulação de um novo compósito.

Adicionalmente, foram utilizadas amostras de lã de vidro, com o intuito de fomentar uma análise comparativa das propriedades dos materiais.

Com o intuito de garantir o ajuste da composição química, foi considerado ainda a utilização de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ).

##### 3.1.1. Escória de Aciaria

Para o desenvolvimento do projeto foi adotada amostra de escória de aciaria LD fornecida pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Após a sua geração, a escória redutora e oxidada, geradas pelo forno panela e conversor, são misturadas e encaminhadas para uma etapa de britagem, separação magnética e posterior separação granulométrica, por meio da utilização de um peneirador, compondo um agregado siderúrgico, com as seguintes características granulométricas:

- Agregado 0 – 0 a 9,5 mm de diâmetro;
- Agregado 2 – 9,5 a 28,6 mm de diâmetro;
- Agregado 3 – 28,6 a 74,6 mm de diâmetro; e
- Agregado 4 – 55 a 152,4 mm de diâmetro.

Finalizada esta etapa de beneficiamento, o material é armazenado em um pátio aberto, passando por um processo de umectação, o qual é essencial para a estabilização do material, uma vez que o ar e a água reagem com os óxidos de cálcio e magnésio, transformando-os em hidratos estáveis.

A amostra obtida para o desenvolvimento do presente trabalho equivale ao agregado 0 mais antigo no pátio de estocagem, cuja composição granulométrica é a mais reduzida dentre as opções disponíveis.

### **3.1.2. Escória de Alto Forno**

Para o desenvolvimento do projeto foi adotada amostra de escória de alto forno a carvão vegetal, fornecida pela Saint-Gobain Canalização. Após o processo de geração, o material em questão passa por um processo de granulação, no qual ocorre um resfriamento brusco por meio de jatos de água sob alta pressão, o qual impede a formação de cristais.

### **3.1.3. Resíduo de Areia de Fundição**

Para o desenvolvimento do projeto foi adotada amostra de areia de fundição, fornecida pela Saint-Gobain Canalização.

### **3.1.4. Lã de Vidro**

Para o desenvolvimento do projeto foram adotadas amostras de lã de vidro de fornecedor reconhecido no mercado brasileiro. A aquisição destes materiais foi essencial para o presente trabalho, uma vez que viabilizou o processo de análise comparativa dos resultados das caracterizações dos compósitos produzidos.

A lã de vidro adquirida remete-se ao produto EE10500000 Feltro WF4 + POP 12500x1200x50 fabricado pela ISOVER (Ordem de Fabricação 0023566943).

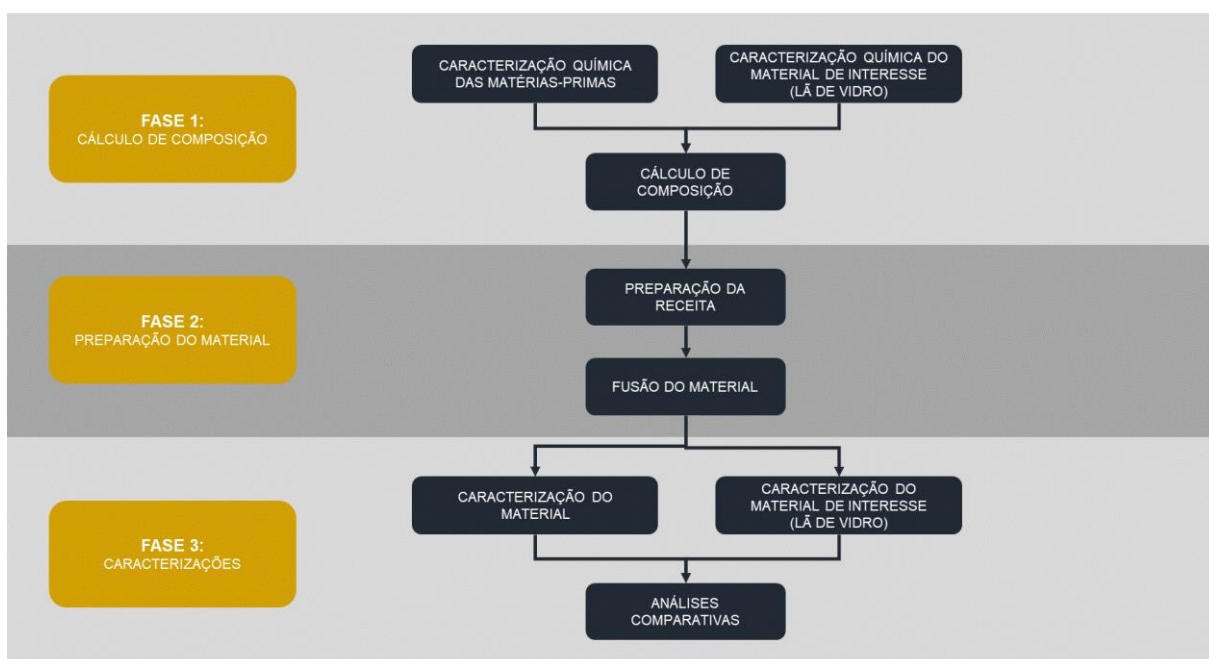
## **3.2 MÉTODOS**

Pode-se dizer que as metodologias utilizadas no presente trabalho subdividem-se em três grandes grupos. Inicialmente, foi realizado o cálculo de composição, com o intuito de definir a formulação chave do material que foi produzido na segunda fase

do projeto. Após a preparação deste foi finalmente realizada a caracterização e análise comparativa do material produzido.

A Figura 3 apresenta um fluxograma resumido das principais atividades desenvolvidas no presente projeto:

**Figura 3.** Fluxograma das Atividades Realizadas



Fonte: Autor (2023)

### 3.2.1. Cálculo de Composição

Após a obtenção das matérias-primas (escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição) e do material de interesse (lã de vidro) foi realizada a caracterização química das amostras, com o intuito de fomentar o estudo da composição do material a ser desenvolvido, comparativamente com os resultados obtidos para a lã de vidro.

Inicialmente, as amostras de escória de aciaria e escória de alto forno passaram por um processo de secagem, uma vez que os materiais em questão apresentavam umidade proveniente das áreas de armazenamento a céu aberto. Tal etapa não foi necessária para o caso do resíduo de areia de fundição e lã de vidro, as

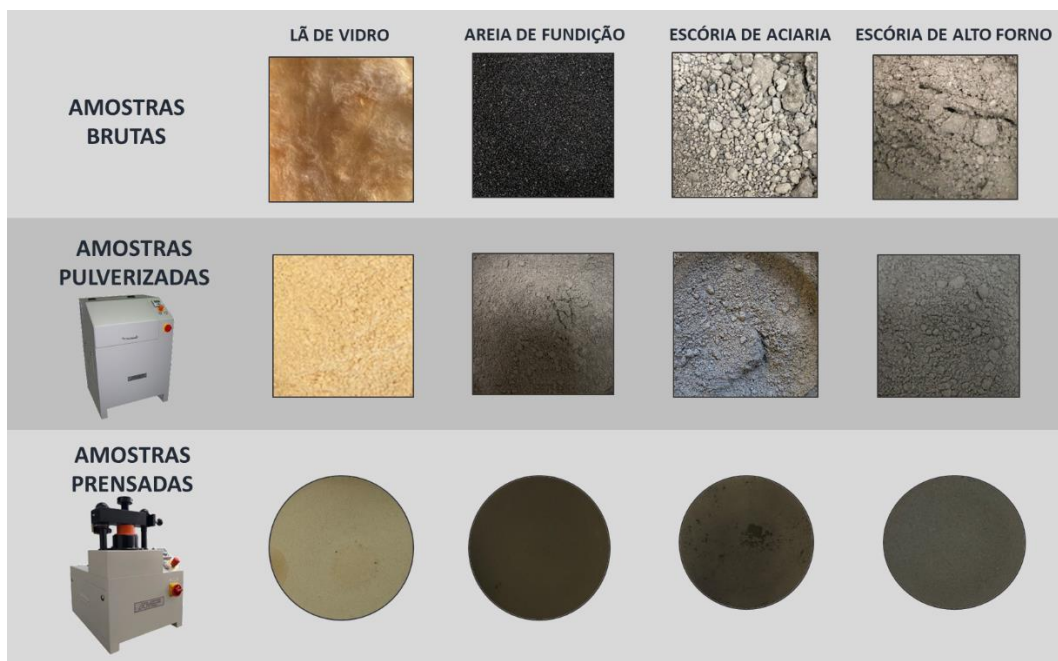
quais apresentavam-se isentas de umidade, devido à suas características de geração e armazenamento.

Posteriormente, cada amostra foi pulverizada em um moinho de panelas, modelo AMEF AMP1-M. Para garantir maior homogeneidade das amostras, após a trituração das mesmas, foi realizado um peneiramento do material, considerando tempo de duração de 10 minutos, sendo utilizado apenas o percentual passante na peneira granulométrica de 200 Mesh (75  $\mu\text{m}$ ).

Finalizada a etapa de homogeneização, foram preparadas pastilhas prensadas a 23 toneladas durante 40 segundos, por meio da utilização de uma prensa, modelo AMEF AP-25 TON.

No caso da amostra de areia de fundição, durante a prensagem observou-se que o material apresentava dificuldade de aderência, culminando em excesso de partículas desprendidas da fôrma. Por conta disso, foi adicionada 1 grama de ácido esteárico ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ) para 13 gramas de amostra. Ressalta-se que a adição de agente aglomerante é necessária para certos tipos de amostras, desde que a composição química de tal agente não seja capaz de comprometer os resultados dos ensaios. Para assegurar a homogeneidade da mistura, a amostra e o agente aglomerante foram novamente pulverizados antes de passar pelo processo de prensagem.

A Figura 4 apresenta uma representação esquemática das amostras em cada uma das etapas de preparação do material para caracterização química.

**Figura 4.** Preparação de Amostras para Caracterização Química

Fonte: Autor (2023)

Após a etapa de preparação das amostras, as pastilhas prensadas foram analisadas por espectrometria por fluorescência de raio x, metodologia esta esmiuçada nos capítulos subsequentes. A Tabela 8 apresenta os resultados das análises químicas realizadas para cada um dos materiais em questão.

**Tabela 8.** Caracterização Química das Matérias-Primas

Composição Química (%)	Lã de Vidro	Escória de Aciaria	Escória de Alto Forno	Resíduo de Areia de Fundição
SiO <sub>2</sub>	63,6	29,3	35,1	91,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	21,0	0,8	5,2
CaO	10,3	36,2	32,8	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4	3,15	16,7	1,1
MgO	1,5	5,6	7,8	0,0
TiO <sub>2</sub>	0,1	0,4	0,5	0,0
Na <sub>2</sub> O	17,7	0,0	2,5	0,0
K <sub>2</sub> O	0,9	0,1	3,2	0,0
MnO	0,5	2,3	0,2	0,1
SO <sub>3</sub>	2,3	0,9	0,3	1,5
Cl	0,0	0,0	0,0	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0	0,6	0,0	0,0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	0,1	0,0	0,0

Fonte: Autor (2023)

Finalizada a etapa de caracterização química das amostras, foi realizado um cálculo de composição dos materiais, visando a maior aproximação possível das composições químicas obtidas para a lã de vidro, conforme demonstrado pela Tabela 9.

**Tabela 9.** Composição em Massa do Material

Componente	Quantidade Adicionada (g)
Escória de Aciaria	100
Escória de Alto Forno	100
Resíduo de Areia de Fundição	600
Dióxido de Silício	10
Óxido de Cálcio	30
Hidróxido de Sódio	160

Fonte: Autor (2023)

Após o cálculo de composição, foi dado início à preparação da mistura. Inicialmente, foi realizada uma etapa de secagem das amostras de escória de aciaria e escória de alto-forno, uma vez que os materiais em questão apresentavam umidade proveniente das áreas de armazenamento a céu aberto. Tal etapa não foi necessária para o caso do resíduo de areia de fundição e aditivos, os quais apresentavam-se isentos de umidade, devido à suas características de geração e armazenamento.

Posteriormente, as amostras de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição foram pulverizadas em um moinho de panelas, modelo AMEF AMP1-M e foi realizada a pesagem dos componentes da mistura, por meio da utilização de uma balança de precisão.

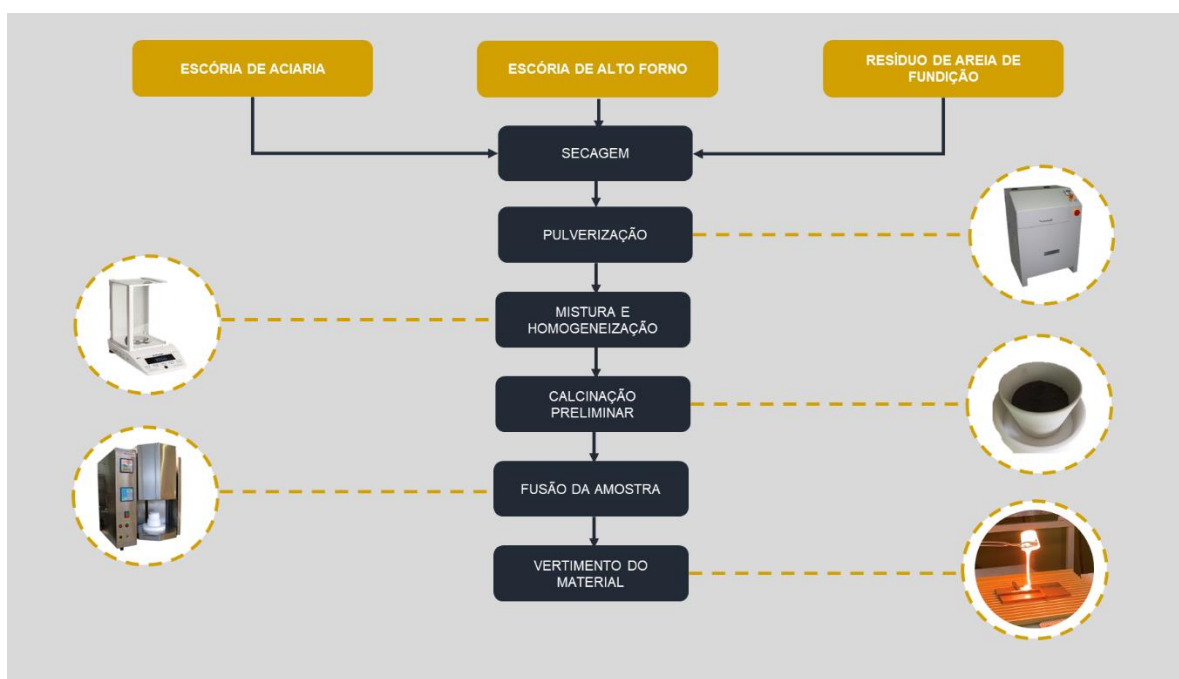
Para garantir a homogeneização dos componentes, a mistura foi levada à um moinho de bolas, sendo devidamente identificada e segregada para os processos subsequentes.

Finalizada esta etapa, o material foi alocado em um cadinho de ZAS, o qual foi posicionado sobre uma base de mesmo material, contendo sílica, cuja função é reter eventuais vazamentos, protegendo o equipamento de possíveis avarias. Este conjunto foi levado para calcinação em mufla, modelo JUNG LF00912, com o objetivo de garantir a eliminação de eventuais gases gerados no processo. Esta etapa foi adotada para proteger o forno a ser utilizado posteriormente para fusão das amostras.

Posteriormente, o mesmo foi levado à um forno mufla para sinterização, modelo FORTELAB MEZ 1600/2, tendo sido programada rampa de aquecimento até alcançar a temperatura de 1550°C, mantendo o material nesta temperatura por um período de 60 minutos. Posteriormente, o material foi vertido em um molde de bronze, tendo sido obtida a amostra para caracterização do produto.

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática de cada uma das etapas de preparação do material.

**Figura 5.** Preparação do Material



Fonte: Autor (2023)

### 3.2.2. Caracterização do Material

Após a preparação do material, o mesmo foi submetido à ensaios de caracterização para avaliar as suas principais propriedades. O presente capítulo possui como principal finalidade descrever as metodologias aplicadas para caracterização das amostras obtidas.

### 3.2.2.1. Inspeção Visual

Durante e após o processo de vertimento do material fundido no molde de bronze, foi realizada uma inspeção visual no material com o objetivo de avaliar o aspecto e a homogeneidade das amostras produzidas, identificar possíveis defeitos e prever o potencial de aplicação do processo adotado.

### 3.2.2.2. Espectrometria por Fluorescência de Raio X

A Espectrometria por Fluorescência de Raio X (FRX) consiste em uma reconhecida técnica analítica para análise qualitativa e quantitativa, sendo adotada, principalmente, nos setores industriais, onde a obtenção ágil do perfil dos constituintes é indispensável. Tais determinações são facilitadas graças a um conjunto favorável de características, os quais são apresentados a seguir (MARGUÍ, QUERALT; ALMEIDA, 2022):

- Capacidade para realização determinações multielementais simultâneas;
- Possibilidade de operação com amostras de diferentes matrizes, sólidas ou líquidas; e
- Apresentação de caráter não-destrutivo.

Esta metodologia é classificada como uma técnica de emissão atômica, fundamentada no efeito fotoelétrico. Desta maneira, quando um átomo é submetido a um processo de irradiação, utilizando-se uma fonte de raio x, um elétron pode ser ejetado das camadas eletrônicas mais internas. Para a estabilização desta forma excitada, constituintes das camadas eletrônicas mais externas suprem rapidamente as vacâncias geradas, liberando a diferença de energia existente entre os dois níveis de energia envolvidos no processo. Como este fator envolve níveis de energia que são característicos de cada elemento, a radiação emitida para cada transição é passível de análise, podendo ser utilizada na identificação da espécie em questão. De mesmo modo, como a intensidade da radiação emitida é diretamente proporcional à concentração da espécie, a técnica também fornece informações que podem ser utilizadas para fins quantitativos (MARGUÍ, QUERALT; ALMEIDA, 2022).

Assim como qualquer outra metodologia analítica, a FRX é uma técnica suscetível à alguns tipos de interferências, os quais são correlacionados à seguir (MARGUÍ, QUERALT; ALMEIDA, 2022):

- **Interferência Física da Matriz:** Assim como em qualquer técnica analítica, grande parte dos problemas de interferência deste tipo é resultado de amostras pouco homogêneas. No caso desta técnica especificamente, a diferença de granulometria dificulta a irradiação homogênea, gerando um sombreamento nas partículas menores. Apesar disso, tal interferência pode ser minimizada efetuando-se processos de trituração e homogeneização da amostra.
- **Espectral:** Representada pela sobreposição de linhas de emissão, os problemas mais graves envolvem a interferência da principal linha do elemento de interesse e outra linha principal ou secundária de outro elemento presente na matriz. Neste caso, é utilizada a técnica de deconvolução espectral e calibração multivariada para minimizar os efeitos da interferência.
- **Efeito de Matriz:** Este tipo de interferência é causado basicamente por fenômenos de absorção ou intensificação do sinal de emissão por parte de outros elementos que compõem a matriz amostral. Uma vez que tais efeitos são sistemáticos e previsíveis, a sua interferência pode ser minimizada com a utilização de um sistema de calibração e métodos matemáticos.

Para o desenvolvimento desta caracterização, considerou-se a utilização de uma pastilha prensada, uma vez que a amostra obtida não possuía superfície completamente lisa e uniforme. Desta maneira, considerando a necessidade de minimizar a interferência física da matriz, o material foi pulverizado em um moinho de painelas modelo AMEF AMP1-M.

Finalizada a etapa de trituração e homogeneização, foram preparadas pastilhas prensadas a 23 toneladas durante 40 segundos, por meio da utilização de uma prensa, modelo AMEF AP-25 TON.

Durante a prensagem observou-se que o material apresentava dificuldade de aderência, culminando em excesso de partículas desprendidas da fôrma. Por conta disso, foi adicionada 0,6 gramas de ácido esteárico ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ) para 10 gramas de amostra. Ressalta-se que a adição de agente aglomerante é necessária para certos tipos de amostras, desde que a composição química de tal agente não seja capaz de comprometer os resultados dos ensaios. Para assegurar a homogeneidade da mistura, a amostra e o agente aglomerante foram novamente pulverizados antes de passar pelo processo de prensagem.

Finalizada esta etapa de preparação, a amostra foi levada para equipamento de FRX, modelo Bruker s2 Ranger, previamente calibrado e verificado com os padrões de controle fornecidos pelo próprio fabricante.

Para o desenvolvimento dos ensaios para caracterização do material obtido, bem como a referência de mercado (lã de vidro) e matérias-primas (escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição), optou-se pela metodologia de análise semi-quantitativa do equipamento denominada EQUA\_OXIDES, tomando-se o devido cuidado para avaliação dos picos gerados e eliminação de eventuais interferências das análises.

### 3.2.2.3. Difractometria de Raio X

A Difractometria de Raio X (DRX) é uma técnica analítica utilizada para análise atômica das estruturas cristalográficas dos materiais. O seu princípio de funcionamento baseia-se na interação dos raios x com os espaçamentos dos átomos que compõem a estrutura do cristal, uma vez que ambos possuem a mesma grandeza, possibilitando o espalhamento das ondas e satisfazendo a Lei de Bragg, responsável pelo fenômeno de difração.

Esta técnica foi empregada no trabalho com o objetivo de verificar o estado amorfo do vidro desenvolvido. Para efeito comparativo também foi realizada a análise do material de referência (lã de vidro).

Para o ensaio, foi utilizado um Difratrômetro de Raio X, modelo Shimadzu XRD-6100, parametrizado para varredura de 10 a 90 graus, considerando passo de 0,02 graus e tempo de 2 segundos por passo.

#### 3.2.2.4. Análise Térmica Simultânea

A Análise Termogravimétrica (TGA) e a Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) são técnicas amplamente difundidas para verificação do comportamento endotérmico e exotérmico do material. Enquanto a TGA monitora a perda ou ganho de massa de uma amostra em função da sua temperatura, o DSC é utilizado para monitorar as variações de entalpia de uma amostra em relação a um material de referência termicamente inerte, fornecendo informações importantes, como a temperatura de fusão, calor específico, transição vítrea, cristalização, sublimação, decomposição e transição cristal líquido, por exemplo.

Estas metodologias foram adotadas no presente trabalho para avaliação do comportamento do material desenvolvido, tendo sido realizada a mesma análise em uma amostra da referência de mercado (lã de vidro) para fins comparativos.

Para a análise do material, foi utilizado um Analisador Térmico Simultâneo, modelo PerkinElmer STA 6000. Foi adicionada 11,449 mg de amostra, inicialmente a 25°C. O material foi submetido a uma taxa de aquecimento de 10°C/min até alcançar a temperatura máxima do equipamento, 900°C. Durante todo o processo, foi considerada atmosfera inerte com fluxo de nitrogênio.

Posteriormente, o ensaio foi repetido, considerando a alteração da taxa de aquecimento para 50°C/min.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INSPEÇÃO VISUAL

Durante o processo de fusão e vertimento da amostra, observou-se a ocorrência de bolhas no material. Por meio da Figura 6 é possível observar que mesmo antes do vertimento da amostra já era possível observar a presença de bolhas, principalmente na região central do cadinho. Após o vertimento e resfriamento da amostra, este fato ficou ainda mais nítido, gerando um aspecto poroso ao material.

**Figura 6.** Inspeção Visual – Ocorrência de Bolhas



Fonte: Autor (2023)

Adicionalmente, observou-se que o material apresentava alta viscosidade, havendo dificuldades no vertimento de todo o volume de material fundido, bem como, inviabilidade de moldagem de material de maneira uniforme.

Este fator, indica a necessidade de ajustes dos parâmetros de fusão para possibilitar a fabricabilidade de lâs minerais, seja mediante a adição de maior quantidade de fundente ou pelo aumento da temperatura de fusão da amostra, o qual

foi um fator limitante do equipamento utilizado para o presente projeto, uma vez que foi utilizada a maior temperatura de trabalho do mesmo.

Após o vertimento e resfriamento da amostra, foi observada a formação de material de diversos formatos e tamanhos, conforme identificado na Figura 7.

**Figura 7.** Inspeção Visual – Formato das Amostras



Fonte: Autor (2023)

Conforme identificado, o material apresentou coloração verde em uma tonalidade bastante escura gerada pela presença de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , uma vez este óxido encontra-se dissolvido na massa (SOUZA; AKERMAN; ORTEGA, 2014).

Ressalta-se que para a aplicação proposta a coloração gerada não implicaria em restrições ao produto, uma vez que para o uso comercial, as lãs de vidro apresentam um recobrimento de aglutinante, o que afeta a coloração final do produto.

Durante o processo de vertimento das amostras, foi observada um importante processo de formação de fibras, o que demonstra que o material possui boa capacidade de desenvolvimento de filamentos, o que é essencial para a aplicação proposta.

A Figura 8 apresenta as fibras identificadas após o resfriamento do material, com seus respectivos diâmetros, os quais foram obtidos por meio de medição utilizando-se um paquímetro.

**Figura 8.** Inspeção Visual – Formação de Fibras



Fonte: Autor (2023)

Conforme é possível observar, as fibras #04 e #06 foram as que apresentaram menores valores de diâmetro, obtendo um resultado de 0,06 mm. É possível observar que resultado obtido é superior ao recomendado pela ABNT NBR 11360, a qual indica que o diâmetro médio da fibra não deve exceder 0,006 mm (ABNT, 2020).

Apesar disso, o resultado obtido demonstra grande potencial do material em gerar fibras, uma vez que não foi adotada nenhuma metodologia de fibragem da amostra, como é o caso do vertimento em orifícios rotativos adotados industrialmente para a confecção de lãs de vidro.

## 4.2 ESPECTROMETRIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos após espectrometria por fluorescência de raios X para as amostras de lã de vidro e o material obtido no presente projeto. Adicionalmente, a tabela em questão apresenta a composição teórica calculada para a definição da composição esperada a partir da análise das matérias-primas utilizadas.

**Tabela 10.** Composição Química

Espécie Química	Lã de Vidro	Composição Teórica	Composição Real
SiO <sub>2</sub>	63,6%	62,5%	61,5%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3%	5,3%	7,6%
CaO	10,3%	9,9%	10,5%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,4%	2,6%	5,8%
MgO	1,5%	1,3%	2,3%
TiO <sub>2</sub>	0,1%	0,1%	0,2%
Na <sub>2</sub> O	17,7%	16,2%	10,3%
K <sub>2</sub> O	0,9%	0,3%	0,5%
MnO	0,5%	0,3%	0,4%
SO <sub>3</sub>	2,3%	1,0%	0,1%
Cl	0,0%	0,0%	0,0%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0%	0,1%	0,3%
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0%	0,0%	0,0%
ZrO <sub>2</sub>	0,0%	0,0%	0,4%

Fonte: Autor (2022)

Os resultados obtidos demonstraram grande proximidade da composição química do material obtido em relação ao seu cálculo teórico, bem como em relação ao material de referência (lã de vidro). Em especial, observa-se a presença de concentrações bem próximas de SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, MnO e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

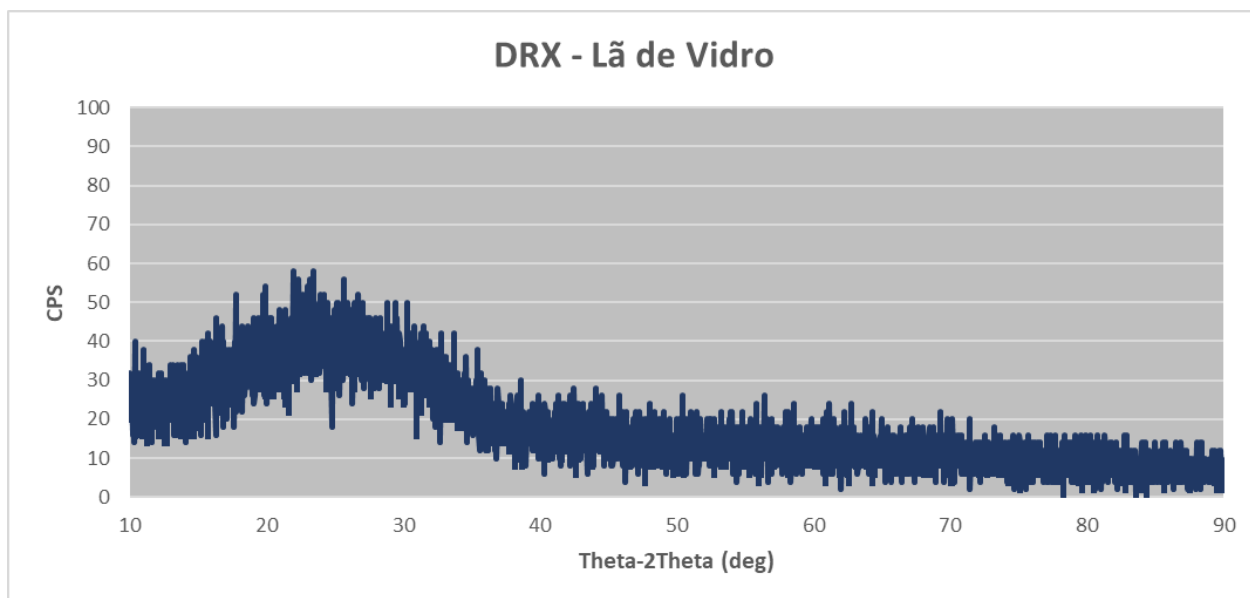
Em relação ao percentual de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , observa-se que o material produzido possui concentração superior à lâ de vidro analisada, o que já era previsto em sua composição teórica, devido ao elevado teor desta espécie presente na escória de aciaria utilizada no projeto.

O teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  obtido foi superior ao percentual encontrado na amostra de lâ de vidro, bem como em relação à concentração teórica calculada. Esta alteração pode ser justificada a partir de uma possível contaminação da amostra pelo material do cadinho utilizado para fusão das amostras, o qual é composto de zircônia, alumina e sílica. Após o processo de fusão das amostras foi observado processo de abaulamento no cadinho e desprendimento de pequenas partículas do mesmo. Esta contaminação foi confirmada devido ao aparecimento de  $\text{ZrO}_2$  no material produzido, uma vez que não havia presença de zircônio em nenhuma das matérias-primas utilizadas.

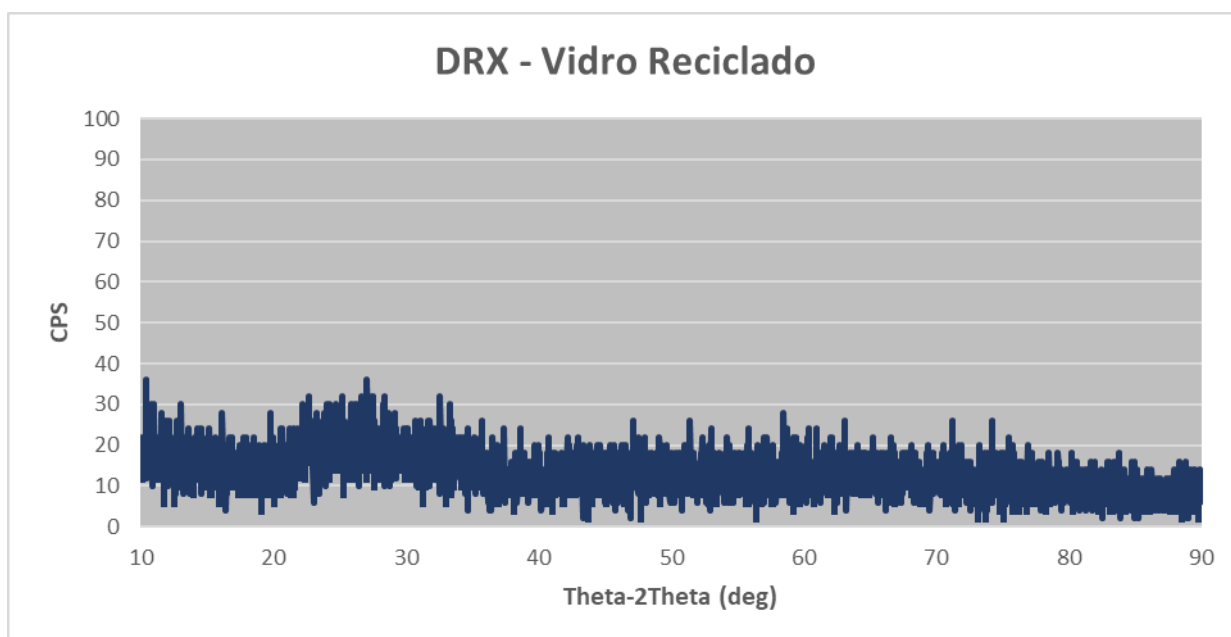
Em relação ao percentual de  $\text{Na}_2\text{O}$ , observa-se que o valor obtido foi inferior ao calculado teoricamente, bem como ao teor encontrado na amostra de lâ de vidro. Esta alteração pode ter sido gerada pela volatilização do sódio do material, o que indica que seria possível uma maior adição do mesmo na mistura, uma vez que o mesmo atua como fundente, reduzindo a viscosidade do material e facilitando a sua trabalhabilidade.

#### 4.3 DIFRATROMETRIA DE RAIOS X

A Figura 9 apresenta o resultado da difratrometria de raios X da amostra de lâ de vidro adquirida comercialmente, enquanto a Figura 10 apresenta o resultado do mesmo ensaio para o material desenvolvido.

**Figura 9.** Difractometria de Raio X – Lã de Vidro

Fonte: Autor (2023)

**Figura 10.** Difractometria de Raio X – Vidro Reciclado

Fonte: Autor (2023)

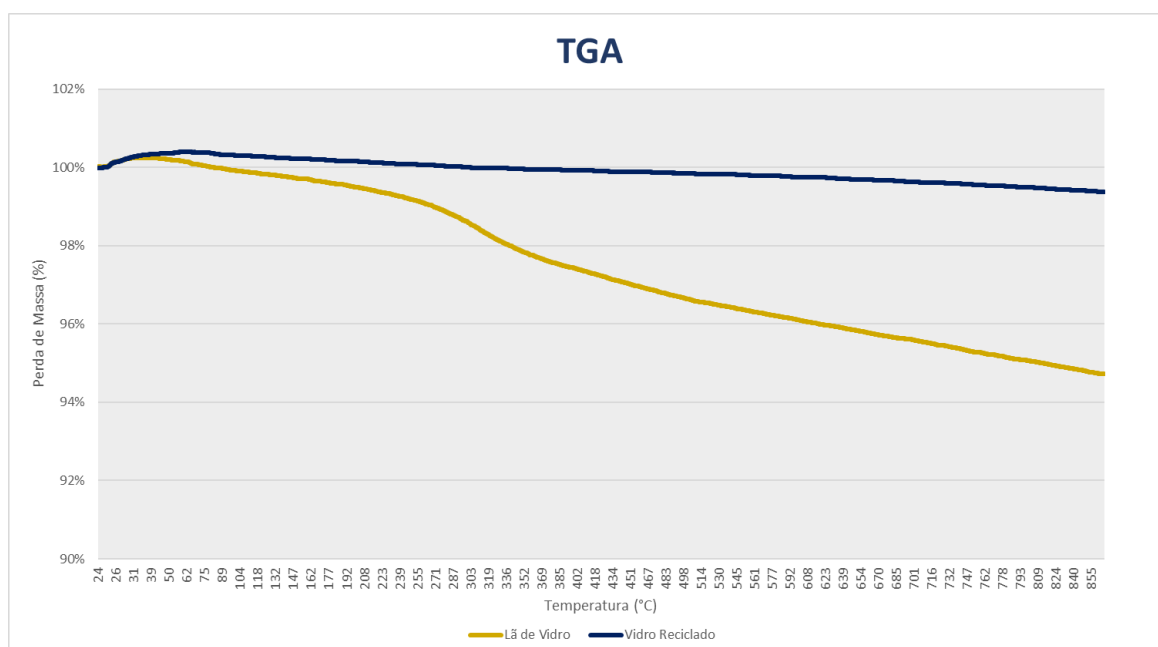
Ambos os espectros obtidos não acusam picos marcantes, os quais são associados à presença de fases cristalinas, o que indica que as amostras analisadas apresentam caráter amorfo, formado somente por um pico de baixa intensidade, o qual é mais marcante no caso da lâ de vidro adquirida comercialmente, sendo localizada na faixa de 15 a 40° (2 $\theta$ ). Em relação ao material desenvolvido, observa-se a presença de banda amorfa de menor intensidade, localizado entre 20 e 35° (2 $\theta$ ).

Adicionalmente, não foram registrados picos cristalinos nestes materiais, o que demonstra que o processo de resfriamento foi eficiente para a formação do vidro.

#### 4.4 ANÁLISE TÉRMICA SIMULTÂNEA

A Figura 11 apresenta os resultados da Análise Termogravimétrica (TGA) para o material de referência (lâ de vidro) e para o vidro reciclado obtido por meio da reciclagem de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição.

**Figura 11.** Análise Termogravimétrica (TGA)



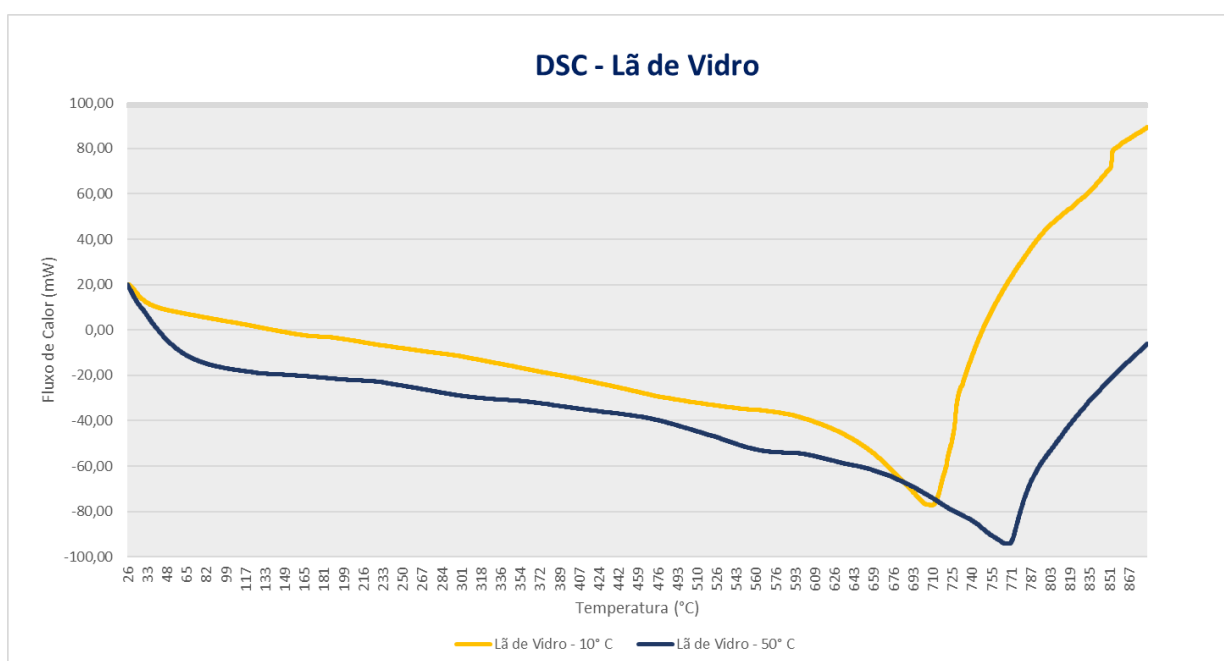
Fonte: Autor (2023)

O gráfico gerado demonstra que ambos os materiais tiveram pouca perda de massa, o que era previsto dado ao comportamento típico dos vidros, os quais apresentam grande estabilidade na faixa de temperatura adotada para o presente ensaio.

No caso do material ora desenvolvido, observa-se que a perda de massa ocorrida corresponde a apenas 1% da massa original de amostra. Enquanto que, ao observar-se os resultados para a amostra de lã de vidro, é verificada uma perda total de 5% de massa. Tal perda de massa pode ser associada a um possível impacto do revestimento de resina utilizada no processo de fibragem da lã de vidro.

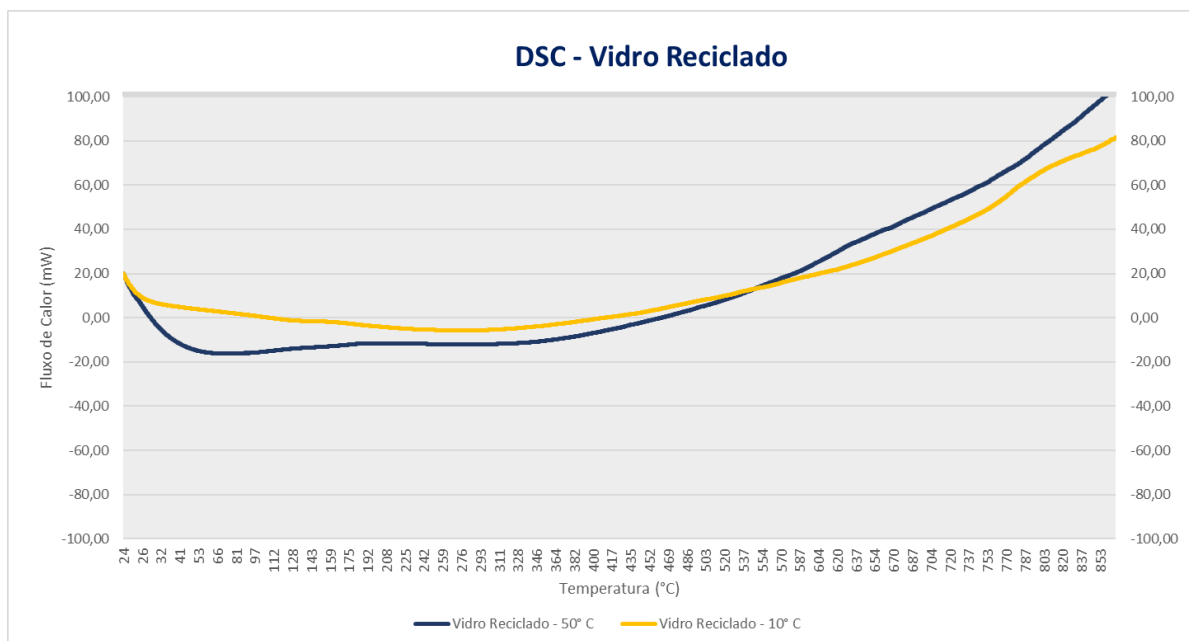
As Figura 12 e Figura 13 apresentam o resultado da Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) da amostra de lã de vidro adquirida comercialmente e do material ora desenvolvido, respectivamente.

**Figura 12. DSC – Lã de Vidro**



Fonte: Autor (2023)

**Figura 13. DSC – Vidro Reciclado**

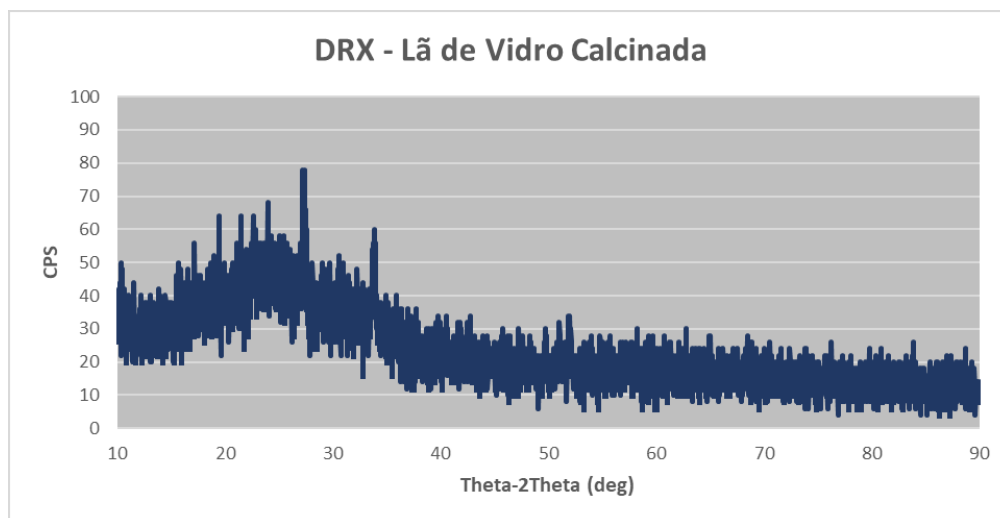


Fonte: Autor (2023)

No caso do material ora desenvolvido, observa-se que não há ocorrência de picos que possam indicar a ocorrência de transição vítrea, cristalização ou fenômeno relevante.

Entretanto, durante a análise dos resultados obtidos para a amostra de lã de vidro, observou-se a ocorrência de um pico a 710°C (no caso da aplicação de taxa de 10 °C/min) e 770 °C (no caso da aplicação de taxa de 50 °C/min). Supõe-se que este pico corresponda a um processo de cristalização ou sinterização. Para confirmar esta hipótese, foi realizada a queima de uma amostra em mufla a 800°C e, após o seu resfriamento, foi realizada a avaliação do material por Difractometria de Raio X (DRX).

A Figura 14 apresenta o resultado obtido após este ensaio. Nesta imagem, é possível verificar a ocorrência de alguns picos, os quais demonstram que houve o início de um processo de recristalização do material, confirmando a hipótese levantada.

**Figura 14. DRX – Lã de Vidro Calcinada**

Fonte: Autor (2023)

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que o presente trabalho atendeu ao seu objetivo principal, uma vez que foi obtido um vidro a base de escória de aciaria, escória de alto forno e resíduo de areia de fundição, cujas características ensaiadas demonstraram compatibilidade com a lâ de vidro, conforme demonstrado abaixo:

- O vidro obtido apresentou composição química similar ao material de interesse (lã de vidro). Dentre os resultados obtidos, observou-se, em especial, uma variação no teor de  $\text{Na}_2\text{O}$ , tendo-se concluído a ocorrência de possível perda por volatilização do sódio. No que tange à este ponto, a adição de maior teor deste componente na mistura favoreceria a trabalhabilidade do material, uma vez que o mesmo atua como um fundente, reduzindo a viscosidade do material. Ressalta-se que este foi um ponto de atenção observado na inspeção visual do material durante o processo de fusão, uma vez que a alta viscosidade do material culminou na dificuldade de vertimento completo do mesmo.
- O vidro demonstrou possuir características amorfas, conforme esperado perante ao material de interesse. Adicionalmente, não foram registrados picos cristalinos, o que demonstra que o processo de resfriamento foi eficiente para a formação do vidro.
- Em relação a Análise Termogravimétrica (TGA) foi observado que o material apresentou pouca perda de massa, o que é compatível com o comportamento típico dos vidros.
- A Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) do material não aponta ocorrência de picos que possam indicar a ocorrência de transição vítrea, cristalização ou fenômeno relevante.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, são realizadas as seguintes proposições para trabalhos futuros, com foco em melhor delimitar e aperfeiçoar o material ora desenvolvido:

- Desenvolvimento de novas formulações, considerando teores mais elevados de  $\text{Na}_2\text{O}$  e maiores temperaturas de fusão, de modo a avaliar o comportamento reológico do material.
- Desenvolvimento de metodologia de fibragem para confecção de uma lã utilizando o material ora apresentado.
- Caracterização termo-acústica da lã reciclada fabricada a partir do material em estudo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte de granito visando a produção de lâ mineral. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós Graduação em Materiais da REDEMAT, **Universidade Federal de Ouro Preto**. Ouro Preto, 2008.

AMANCIO, F; LIMA, D; DIAS, A; MESQUITA, E; CABRAL, A. Propriedades mecânicas de argamassas com substituição de areia natural por escória de aciaria BSSF (*baosteel's slag short flow*). **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n.1, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FERRO FUNDIDO. Desempenho do setor de fundição – Dezembro, 2020. Disponível em <<https://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2021/01/12-BOLETIM-DEZEMBRO-20.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS (ABM). Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico. Brasília, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 11360 – Isolantes térmicos de lâ de vidro – Flocos – Especificação. Abril, 2020.

ASSOCIACIÓN DE FABRICANTES ESPAÑOLES DE LANAS MINERALAS AISLANTES. Dies razones para utilizar las lanas minerales. Madrid, 2015. Disponível em < [file:///C:/Users/A0505291/Downloads/10razones%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/A0505291/Downloads/10razones%20(1).pdf)>. Acesso em: 32 mai. 2021.

AWUCHI, C; AWUCHI, C; AMAGWULA, I; IGWE, V. *Industrial and community waste management: global perspective*. **American Journal of Physical Science**,v.1, n.1, p.1-16, 2020.

BARBOZA, D; SILVA, F; MOTTA, W; MEIRIÑO, M; FARIA, A. Aplicação da economia circular na construção civil. **Research, Society and Development**, v.8, n.7, 2019.

BARRETO, R; OLIVEIRA, R; FERNANDES, G; SANTANA, M; HILARIO, R. Determinação da resistência a partir da porosidade e absorção da brita Gnaisse e da escória de aciaria LD. **ENGEVISTA**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 5, p. 623-636, 2018.

BORGES, P; JUNCA, E; GRILLO, F; TELLES, V; OLIVEIRA, J; TENÓRIO, J. Incorporação de resíduo de lâ de vidro em concreto. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 14, n. 4, p. 373-379, 2017.

BRASIL. Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n. 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2010.

CANAL, R; ROSÁRIO, C; PIRES, P. Estudo da viabilidade do uso de escória de aciaria e resíduo de rochas ornamentais como lastro ferroviário. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 23335-23352, 2020.

CASALI, J; MIGUEL, T; FELIZARDO, C; MEIRA, N; DOMINGUINI, L; BETIOLI, A. Caracterização e influência do teor do resíduo de areia de fundição fenólica em argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 18

CECHIN, L; MATOSKI, A; LIMA, A; WEBER, A; TOKARSKI, R. Efeito da adição de escória de alto-forno em compósitos com bambu mossô. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, 2018.

COMPARI, T; LERMEN, R; SILVA, R; FARIAS, S; BONSEMBIANTE, F; DALLAGO, R. Estudo preliminar do uso dos finos do resíduo da areia verde de fundição no desenvolvimento de pastas geopoliméricas. **XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2020.

CONSENZA, L; ANDRADE, E; ASSUNÇÃO, G. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 9, n.1, p. 1-30, 2020.

COSTA, W; CHOQUE FERNANDEZ, O; SOUSA, M. Caracterização de escórias de aciaria e de alto-forno produzidas em usinas ao longo da estrada de ferro Carajás para aplicação industrial. **XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, Belo Horizonte, 2019.

DIAS, A; AMANCIO, F; SOUSA, I; LUCAS, S; LIMA, D; CABRAL, A. Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, 2020.

DYER, P; KLINSKY, L; SILVA, S; LIMA, M. O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2021.

EUROPEAN COMMISSION. Closing the loop – an EU action plan for the Circular Economy. 2015. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>>. Acesso em: 02 jan. 2021.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION RESEARCH AND TECHNOLOGY. User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction. 2016. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/bfs1.cfm>>. Acesso em: 09 abr. 2021.

FREIRE, A. C.; MAIA, A. Estado da arte Ibero-Brasileira sobre a aplicação de agregados de escoria de aciaria em misturas betuminosas. **Geotecnia**, Portugal, n. 146, p. 19-50, 2019.

FREITAS, S. Escória de Aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Materiais da REDEMAT, **Universidade Federal de Ouro Preto**. Ouro Preto, 2018.

GARCIA, E. S. H.; THIVES, L. P.; ECHEVERRIA, J. A. S. Análise laboratorial da incorporação de resíduo de areia de fundição em misturas asfálticas. **32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte ANPET**, Rio Grande do Sul, p. 1632-1643, 2018.

GHISLENI, G; LIMA, G. T. S. Estudo da viabilidade de reutilização da areia de fundição na produção de blocos de concreto e concreto convencional. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. esp., p. 551-570, 2020.

INSTITUTO AÇO BRASIL IABr. Estatísticas da Siderurgia – 3º Trimestre. 2020. Disponível em <[https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/11/Estatistica-da-Siderurgia\\_3o\\_TRI\\_2020.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/11/Estatistica-da-Siderurgia_3o_TRI_2020.pdf)>. Acesso em: 05 abr. 2021.

JIANLONG, G; YANPING, B; MIN, W. *Steel slag in China: treatment, recycling and management*. **Waste Management**, v. 78, p.318-330, 2018.

LANGARO, E; LUZ, C; BUTH, I; MORAES, M; FILHO, J; MATOSKI, A. A influência da composição química e da finura no desempenho de cimentos álcali ativados obtidos com escórias de alto forno. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n.1, 2017.

LERMEN, R; BONATTO, G; SILVA, R. Utilização do resíduo de areia verde de fundição no desenvolvimento de concreto espimígeno. **Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, v. 9, n. 1, p. 153-170, 2020.

LUVIZÃO, G; SALLA, R; NIENOV, F; ZAMPIETI, L. Incorporação de resíduo de areia de fundição em misturas asfálticas usinadas à quente: avaliação dos componentes presentes na água de solubilização e do comportamento mecânico. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC**, Palmas, 2019.

MARGUÍ, E; QUERALT, I; ALMEIDA, E. *X-ray fluorescence spectrometry for environmental analysis: Basic principles, instrumentation, applications and recent trends*. **Chemosphere**, v. 303, p. 1, 2022.

MARTIN, A; SCHABBACH, L; FOLGUERAS, M. Síntese de pigmentos de níquel utilizando areia descartada de fundição como fonte de sílica. **Cerâmica**, v. 65, n. 376, São Paulo, 2019.

MICHIANSKI, S. SANTOS, A. Utilização da escória de alto forno produzida na cidade de Pato Branco – PR para a produção de cimento supersulfatado. **Revista Técnico-Científica – CREA-PR**, Paraná, 2019.

MOURA, B; TEIXEIRA, J; PIRES, P; SIMÃO, R; KHEDMATI, M; KIM, Y. Avaliação da adesividade ligante-escória de alto-forno resfriada ao ar (ACBFS) e de aciaria (LD) usando técnicas de análise de superfícies. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, Balneário Camboriú, 2019.

OLIVEIRA, F; FRANÇA, S; RANGEL, L. Princípios da economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. **Interações (Campo Grande)**, Campo Grande, v. 20, n. 4, p. 1179-1193, 2019.

OLIVEIRA, M; FERNANDES, D; BÔAS, R; BACKES, C; GODOY, L; SANTOS, A. Correção do solo para plantio de grama bermuda utilizando escória de aciaria ou calcário. **Ornamental Horticulture**, Viçosa, v. 26, n. 3, 2020.

PALOD, R; DEO, S; RAMTEKKAR, G. *Sustainable approach for Linz-Donawitz slag waste as a replacement of cement in concrete: mechanical, microstructural and durability properties.* **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, 2020.

PEREIRA, A; RAMOS, F; SILVA, M. Caracterização estrutural de geopolímeros sustentáveis de escória de aciaria LD e escória de aciaria LF com KOH. **Matéria**, Rio de Janeiro, vol. 25, n.3, 2020.

PIMENTEL, M; VASCONCELOS, A; PIKANÇO, M; SOUZA, J; MACÊDO, A. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando o seu uso na construção civil. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 3, n.2, p. 895-907, 2019.

ROCHA, B; LIMA, F; WALDMAN, R. Mudanças no papel do indivíduo pós-revolução industrial e o mercado de trabalho na sociedade da informação. **Revista Pensamento Jurídico**, v.14, n.1, p. 298-318. São Paulo, 2020

SAKAR, C; BASU, J; SAMANTA, A. *Microwave activated LD slag for phenolic wastewater treatment: Multi-parameter optimization, isotherms, kinetics and thermodynamics.* **Chemical Engineering Transactions**, Itália, v. 57, 2017.

SANTOS, A; PITANGA, H; SILVA, A; SILVA, T. Caracterização do comportamento mecânico de misturas de solo-escória de aciaria-cinza volante visando a aplicação em pavimentação. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 7, n. 1, p. 16-29, 2018.

SEHNEM, S; PEREIRA, S. Rumo à Economia Circular: Sinergia existente entre as definições conceituais correlatas e apropriação para a literatura brasileira. **RECADM – Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v.18, n.1, 2019.

SILVA, L; MAGALHÃES, R; MACEDO, W; SANTOS, G; ALBAS, A; TEIXEIRA, S. Utilização de areia descartada de fundição (ADF) e resíduos inorgânicos da indústria de papel e celulose para a produção de materiais vitrocerâmicos. **Cerâmica**, v. 66, n. 380, São Paulo, 2020.

SILVA, W. K. D.; AMANCIO, F. A.; DIAS, A. R. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Estudo preliminar da utilização da escória de aciaria como agregado miúdo em argamassas de revestimento. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Paraná, v.11, n.2, p. 59-70, 2019.

SOUZA, M; AKERMAN, M; ORTEGA, F. A influência do teor de ferro nas características de aquecimento e fragmentação do vidro sodo-cálcico temperado termicamente. **58º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. Bento Gonçalves, 2014.

SOUZA, W; SOUZA, D; JUNIOR, J; SILVA, W. Fabricação de tijolos ecológicos com adição de escória de alto forno. **V Congresso Interdisciplinar**, Goianésia, 2018.

SOUZA, W.; SILVA, W; SOUZA, D; JUNIOR, J. Fabricação de tijolos ecológicos solo cimento com adição de escória de aciaria. **VI CONINT – Congresso Interdisciplinar**, Goianésia, v. 4, n.1, 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2020. p. 86-87. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-iron-steel-slag.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2021.

YLINIEMI, J; LUUKKONEN, T; KAISER, A ; ILLIKAINEN, M. Mineral wool waste-based geopolymers. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 297, 2019.