

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E RTECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS – *CAMPUS* OURO BRANCO
BACHARELADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Abimael Evangelista Santos

CARACTERIZAÇÃO E USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Ouro Branco

2023

ABIMAEV EVANGELISTA SANTOS

CARACTERIZAÇÃO E USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Ouro Branco para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.
Orientador: Heric Henrique Souza e Silva

Ouro Branco

2023

S237c Santos, Abimael Evangelista.

Caracterização e uso da escória de aciaria [manuscrito] / Abimael Evangelista Santos. – 2023.

63 f. : il.: color.

Orientador: Heric Henrique Souza e Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco, 2023.

1. Escória de aciaria. 2. Cimento portland. 3. Reutilização da escória. I. Silva, Heric Henrique Souza e. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* Ouro Branco. III. Título.

CDU 669.162.275.2

Catálogo: Rosângela Marques de Souza - CRB-6/2126



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Ouro Branco
Diretoria de Ensino, Pesquisa e Extensão
Docentes Metalurgia
Rua Afonso Sardinha, número 90 - Bairro Minas Talco - CEP 36494-018 - Ouro Branco - MG
- www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DO TCC

Ao primeiro dia do mês de julho do ano de 2023, às 08:00 horas, sob a presidência de Heric Henrique Souza e Silva, o discente ABIMAEL EVANGELISTA SANTOS do Curso de Engenharia Metalúrgica, R.A nº 0038807 do IFMG – Campus Ouro Branco defendeu o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “CARACTERIZAÇÃO E USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA” e foi APROVADO com a nota **90%**, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

Caso seja aprovado, deverá apresentar o trabalho com as devidas modificações em formato pdf, em 21/07/2023 (20 dias corridos após a data da defesa) à Coordenação de TCC. O não cumprimento dos procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, implica em atribuição de nota ZERO e consequente REPROVAÇÃO.

Alterações sugeridas pela banca examinadora e outras observações pertinentes à defesa:

Atenção aos comentários realizados durante a apresentação e às marcações no texto para a reescrita e elaboração da versão final.

-

DECLARAÇÃO ANTI-PLÁGIO

Eu, Abimael Evangelista Santos, estudante do curso de |Bacharelado em Engenharia Metalúrgica do IFMG — Campus Ouro Branco, declaro, para os devidos fins e efeitos, e para fazer prova junto ao IFMG — Campus Ouro Branco, que, **sob as penalidades previstas no art. 299 do Código Penal Brasileiro**, que é de minha criação o trabalho de conclusão de curso que ora apresento.

Art. 299 do Código Penal Brasileiro, que dispõe sobre o crime de Falsidade Ideológica:

"Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia estar escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar verdade sobre fato juridicamente relevante: Pena — reclusão, de 1 (um) a 5 (cinco) anos, e multa, se o documento é público, e reclusão de 1 (um) a 3 (três) anos, e multa, se o documento é particular.

Parágrafo único. Se o agente é funcionário público, e comete o crime prevalecendo-se do cargo, ou se a falsificação ou alteração é de assentamento de registro civil, aumenta-se a pena de sexta parte." Este crime engloba plágio e compra fraudulenta de documentos científicos.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração.

Orientador; Prof. Heric Henrique Souza e Silva

Membro 2 - Prof. Antonio Marlon Barros Silva

Membro 3 - Prof. David Hebert Vieira

Aluno: Abimael Evangelista Santos

Ouro Branco, 30 de junho de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Heric Henrique Souza e Silva**, **Professor**, em 01/07/2023, às 10:39, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **ABIMAEV EVANGELISTA SANTOS**, **Aluno**, em 01/07/2023, às 23:42, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Marlon Barros Silva**, **Professor**, em 02/07/2023, às 21:46, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **David Hebert Vieira**, **Professor**, em 05/07/2023, às 06:53, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1600967** e o código CRC **D7F938B6**.

23712.000848/2023-11

1600967v1

Dedico esta dissertação aos meus irmãos, Clóvis, Mirian, Netanias, Rute e Suelen por sempre me apoiarem e tonarem esta conquista possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por me guiar e permitir que eu alcance tamanha conquista.

Ao professor Heric Henrique Souza e Silva, por aceitar o desafio de me guiar na realização deste trabalho.

Aos professores Antônio Marlon Barros Silva, David Hebert Vieira e Tainan Ferreira Muniz por todas as contribuições que elevaram o nível deste trabalho.

A todos os meus amigos que me incentivaram e me deram forças nos momentos mais desafiadores.

A todos que direta ou indiretamente me ajudaram na concretização deste trabalho.

"A sabedoria começa na reflexão."

Sócrates.

RESUMO

Devido ao grande volume produzido, os coprodutos industriais muitas vezes apresentam problemas de armazenamento e descarte. No entanto, em comparação com as matérias-primas tradicionais, esses coprodutos podem oferecer uma alternativa mais barata e com melhores características para aplicação na indústria civil, agrícola entre outras, além de proporcionar uma destinação adequada a estes materiais. A escória de aciaria é um subproduto gerado durante o processo de fabricação do aço e sua aplicação é limitada devido às suas características químicas que resultam em expansão. Esses materiais são geralmente armazenados inicialmente nos pátios das siderúrgicas, sem um destino específico. A escória de aciaria costuma apresentar instabilidade e características expansivas, o que restringe sua utilização em outros setores. Avaliar o uso da escória de aciaria envolve uma consideração crucial: a quantidade de óxido de cálcio e óxido de magnésio livres presentes no material. De acordo com a literatura técnica, esses compostos desempenham um papel fundamental nas propriedades expansivas da escória, tornando essencial medir com precisão seus teores antes de sua utilização. Após a cura, a escória de aciaria encontra aplicação em diversos setores, incluindo indústria cimenteira, pavimentação, construção civil, agricultura e ferrovias; a utilização da escória de aciaria como coproduto oferece benefícios ambientais ao evitar o descarte em aterros, contribuindo para a conservação dos recursos naturais, além de criar oportunidades de aplicação em diversos ramos industriais. Com base nesse contexto, este trabalho traz uma avaliação das principais propriedades e características da escória de aciaria, além de destacar as principais possibilidades de utilização desse coproduto. Serão exploradas alternativas e aplicações potenciais visando maximizar seu aproveitamento e contribuir para uma gestão mais eficiente deste coproduto da siderurgia.

Palavras-chave: Escória de Aciaria. Cimento Portland. Reutilização da Escória.

ABSTRACT

Due to the large volume produced, industrial co-products often present storage and disposal problems. However, compared to traditional raw materials, these co-products can offer a cheaper alternative with better characteristics for application in the civil and agricultural industries, among others, in addition to providing an adequate destination for these materials. Steel slag is a byproduct generated during the steel manufacturing process and its application is limited due to its chemical characteristics that result in expansion. These materials are generally initially stored in steel mill yards, without a specific destination. Steel slag tends to present instability and expansive characteristics, which restricts its use in other sectors. Evaluating the use of steel slag involves a crucial consideration: the amount of free calcium oxide and magnesium oxide present in the material. According to the technical literature, these compounds play a fundamental role in the expansive properties of slag, making it essential to accurately measure their levels before use. After curing, steel slag finds application in several sectors, including the cement industry, paving, civil construction, agriculture and railways; The use of steel slag as a co-product offers environmental benefits by avoiding disposal in landfills, contributing to the conservation of natural resources, in addition to creating opportunities for application in various industrial sectors. Based on this context, this work provides an assessment of the main properties and characteristics of steel slag, in addition to highlighting the main possibilities for using this co-product. Potential alternatives and applications will be explored to maximize their use and contribute to more efficient management of this steelmaking co-product.

Keywords: Steel Slag. Portland Cement. Slag Reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Sequência de operação do conversor LD | 9 |
| Figura 4 - Pavimento com a utilização de escória não curada (expandida) | 16 |
| Figura 5 - Sistema cristalino CaO..... | 19 |
| Figura 6 - Sistema cristalino e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 19 |
| Figura 7 - Diagrama ternário CaO-SiO ₂ -H ₂ O (C-S-H) | 22 |
| Figura 8 - Frasco com tampa | 26 |
| Gráfico 1 - Registro difratométrico de uma amostra de escória de aciaria | 28 |
| Figura 9 - Representação esquemática do processo de beneficiamento de escória, precedido de sua origem no processo siderúrgico | 30 |
| Figura 10 - Escória bruta de aciaria | 31 |
| Figura 11 - Basculamento da escória de aciaria. | 32 |
| Figura 12 - Resfriamento da escória de aciaria..... | 32 |
| Figura 13 - Planta de beneficiamento..... | 33 |
| Figura 14 - Pilha de escória sendo tratada com vapor de água. | 37 |
| Figura 15 - Autoclave desenvolvida pela Sumitomo e Kawasaki. | 38 |
| Gráfico 2 - Processo de cura da escória versus expansão | 38 |
| Figura 16 - Processo de inertização da escória no estado líquido. | 39 |
| Figura 17 - Beneficiamento da escória de aciaria processo BSSF..... | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Produção brasileira de aço bruto em 2021 | 3 |
| Tabela 2 - Aplicação dos agregados siderúrgicos de aciaria no Brasil | 4 |
| Tabela 3 - Produção de aço Bruto por processo de aciaria em 2022 no Brasil..... | 6 |
| Tabela 4 - Siderurgia brasileira e mundial | 7 |
| Tabela 5 - Composição química típica da escória LD granulada | 11 |
| Tabela 6 - Constantes físico-químicas das reações de hidratação e carbonatação do CaO e do MgO..... | 17 |
| Tabela 7 - Massa mínima por amostra de ensaio | 24 |
| Tabela 8 - Técnicas conhecidas para o tratamento da escória de aciaria..... | 34 |
| Tabela 9 - Principais características da escória de aciaria em comparação com o clínquer e cimento Portland | 44 |

LISTA DE ABREVIATURAS

< - Menor que

% - Porcentagem

→ - Reação química irreversível

+ - Soma

DENR-ME - Departamento de Estrada e rodagem – Método de Ensaio

EOF - Energy Optimizing Furnace

kg - Quilogramas

LD - Linz Donawitz

NBR - Norma Brasileira

t - Toneladas

TIMA-MIRA - TIMA - Tescan Integrated Mineral Analyzer, MIRA - nome comercial

TM - Marca comercial

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

X - Fração

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | OBJETIVOS | 5 |
| 2.1 | Objetivos Gerais | 5 |
| 2.2 | Objetivos Específicos..... | 5 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA..... | 6 |
| 3.1 | Processo LD..... | 6 |
| 3.1.1 | <i>Ciclo do Conversor.....</i> | 8 |
| 3.2 | Características da escória de aciaria | 9 |
| 3.2.1 | <i>Expansibilidade</i> | 13 |
| 3.2.2 | <i>Expansão de CaO e MgO</i> | 18 |
| 3.2.3 | <i>Expansão em função do polimorfismo do silicato de dicálcio.....</i> | 21 |
| 3.3 | Métodos para ensaios de caracterização da escória de aciaria | 23 |
| 3.3.1 | <i>Caracterização física</i> | 23 |
| 3.3.2 | <i>Caracterização química.....</i> | 26 |
| 3.3.3 | <i>Processamento</i> | 30 |
| 3.4 | Tratamento da escória de aciaria | 33 |
| 3.4.1 | <i>Envelhecimento ou cura</i> | 35 |
| 3.4.2 | <i>Cura com a utilização de vapor de água.....</i> | 36 |
| 3.4.3 | <i>Cura com vapor sob pressão ou processo SKAP (Sumitomo Kawasaki Aging Process).....</i> | 37 |
| 3.4.4 | <i>Cura por adição de sílica a escória LD no estado líquido.....</i> | 39 |
| 3.4.5 | <i>Metodologia para produção da ACERITA.....</i> | 40 |
| 3.4.6 | <i>BSSF - Baosteel's Slag Short Flow</i> | 40 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 42 |
| 5 | DISCUSSÃO DA PROBLEMÁTICA..... | 43 |
| 5.1 | Indústrias produtoras de cimento | 44 |
| 5.2 | Pavimentação e construção civil | 46 |
| 5.3 | Agricultura..... | 49 |
| 5.4 | Lastro ferroviário | 52 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 54 |
| 7 | SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS | 55 |

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as principais aplicações da escória de aciaria, após passar por processamento, são na pavimentação rodoviária, como lastro ferroviário e como material para enchimento. Já na União Europeia, as aplicações incluem pavimentação rodoviária, reciclagem interna (em pátios internos, aterros, pavimentação interna, entre outros), fabricação de cimento, fertilizantes e utilização como material construtivo em barragens (engenharia hidráulica). Na Europa, as escórias são amplamente utilizadas na composição da camada asfáltica, enquanto no Brasil, geralmente são utilizadas como base ou sub-base para estradas. No entanto, nos países desenvolvidos, a disposição das escórias em aterros controlados é onerosa e, em alguns casos, não é permitida, pois existe um potencial de utilização desses materiais. Para evitar o descarte das escórias e agregar valor a esse subproduto, diversos países têm desenvolvido diferentes aplicações. Destacam-se, entre essas aplicações, os corretivos de solo e fertilizantes para a agricultura, o uso como agregado na fabricação de cimento, pavimentações e na construção civil. Essas iniciativas visam evitar o descarte das escórias e, ao mesmo tempo, explorar seu potencial como recurso útil em outros setores.

Os resíduos industriais representam uma quantidade significativa de material gerado anualmente, e sua utilização adequada desempenha um papel fundamental na conservação do meio ambiente. De acordo com dados do Instituto Aço Brasil, foram produzidas 5,4 milhões de toneladas de escória no Brasil em 2022, a Euroslag relatou que a produção de escória de aciaria na Europa atingiu 22,6 milhões de toneladas em 2018, enquanto a NIPPON Slag Association divulgou que 1,93 milhões de toneladas de escória de aciaria foram produzidas no Japão em 2021 e com base nos dados da World Steel para produção de aço na China foram geradas 155 milhões de toneladas de escória de aciaria em 2021. Esses números destacam a quantidade expressiva de escória de aciaria gerada globalmente e a importância de encontrar formas eficientes de sua utilização.

Dentre estes resíduos gerados na siderurgia está a escória de aciaria que pode ser utilizada como um agregado em diversos setores da construção civil, desde a aplicação na composição de cimentos e argamassas como em obras de rodovias.

De acordo com a NBR 10.004 (2004), os resíduos são classificados em três categorias distintas. A primeira categoria, denominada Resíduos de Categoria 1, se refere aos resíduos considerados perigosos, tais como aqueles que são inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos e patogênicos, e que podem representar risco à saúde pública. Já a segunda categoria, Resíduos de Categoria 2, é composta por uma mistura de resíduos não inertes ou sólidos que não se enquadram na classificação de resíduos 1 ou 3. Esses resíduos podem ser inflamáveis, biodegradáveis ou solúveis em água. Por fim, a terceira categoria, Resíduos de Categoria 3, é formada por resíduos ou misturas de resíduos sólidos testados para solubilização de acordo com a NBR 10.006 e que não possuem quaisquer constituintes em concentrações superiores aos critérios definidos no anexo G da norma.

As escórias de aciaria provenientes do processo LD são classificadas como resíduos não-inertes, categoria dois, conforme a NBR 10004. Esses resíduos são gerados como subproduto do processo de fabricação de aço e descartados como resíduo sólido. No entanto, a escória de aciaria pode ter seu potencial de uso maximizado se as limitações do material forem corrigidas, sendo a expansibilidade a principal delas.

A expansibilidade das escórias de aciaria é causada principalmente pela hidratação do CaO e do MgO, bem como pela oxidação do ferro metálico residual. Essas reações provocam um aumento considerável no volume das escórias, o que pode ser problemático quando em contato com o ambiente. Por esse motivo, é necessário estudar formas de minimizar essa expansibilidade e tornar a escória de aciaria um material de melhor aproveitamento. Estudos nessa área são importantes devido aos altos teores de CaO presentes na escória e aos efeitos de expansão que podem causar quando utilizadas em outros produtos.

A designação dos materiais pode variar de acordo com o seu destino final, sendo que o termo "Rejeito" é utilizado para descrever o material resultante de um processo industrial que não possui valor econômico ou ambiental, sendo descartado sem nenhum tipo de tratamento. Por outro lado, o termo "Coproduto" se refere a um subproduto gerado durante um processo produtivo que possui valor comercial e pode ser utilizado em outras indústrias ou processos.

Os materiais associados à produção siderúrgica possuem diferentes destinações, se estes materiais têm viabilidade técnica e econômica para serem empregadas em outros setores, recebe a designação de coprodutos, eles podem, ser utilizados em construções civis, pavimentações, fabricação de cimentos e argamassas, além de outros compósitos, por exemplo. Neste contexto, as escórias siderúrgicas deixam de ser consideradas rejeitos.

O total de coprodutos e resíduos específicos gerados no processo de produção do aço no Brasil em 2020 foi de 19,5 milhões de toneladas, sendo que mais 90% deles são reaproveitados (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021). Com base nos dados da Tabela 1, as usinas integradas são responsáveis por grande parte da produção de aço bruto no Brasil, ou seja, 4,53 milhões de toneladas de coprodutos enquanto apenas 0,88 milhões de toneladas de coprodutos advém das usinas semi-integradas.

Tabela 1 - Produção brasileira de aço bruto em 2021

| Configuração Técnica das Usinas | Produção de Aço Bruto (10 ³ t) | Participação (%) |
|---------------------------------|---|------------------|
| Integradas | 30.186 | 83,7 |
| Semi-Integradas | 5.885 | 16,3 |
| TOTAL | 36.071 | 100 |

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2022.

Dentre estes, os agregados siderúrgicos de aciaria são aplicados especialmente como matéria prima em base e sub-base de estradas, nivelamento de terrenos, uso agrônômico, aterros e agregados de concreto, conforme demonstrado na Tabela 2, a utilização nos anos de 2018 a 2020. Os benefícios de reutilizar estes recursos incluem a preservação de recursos naturais não renováveis (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

Tabela 2 - Aplicação dos agregados siderúrgicos de aciaria no Brasil

| Aplicação dos Agregados Siderúrgicos de Aciaria | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|------|------|------|
| Base e sub-base de estrada | 44% | 71% | 78% |
| Nivelamento de Terreno | 39% | 16% | 8% |
| Outros | 12% | 10% | 11% |
| Uso Agronômico | 4% | 3% | 3% |
| Agregados de Concreto | 1% | 1% | 1% |

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2021.

Para a constatação destes dados, em todos os anos foram considerados 10 grupos empresariais, responsáveis por 98%, 89%, e 85% da produção de aço bruto nos períodos de 2018, 2019 e 2020 respectivamente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Realizar uma revisão bibliográfica sobre abordagens que permitam a utilização mais eficiente da escória de aciaria, levando em conta que, após passar por um tratamento adequado, sua aplicação em diferentes setores se torna viável.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Apresentar os métodos para quantificar a expansão das escórias por meio de ensaios;
- b) Apresentar os processos de estabilização que estão sendo utilizados no Brasil e no mundo;
- c) Identificar as principais aplicações da escória de aciaria.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Processo LD

O processo de conversor a oxigênio foi projetado por Henry Bessemer em 1856, mas somente em 1938 foi realizado o primeiro experimento de sopro de oxigênio na superfície do metal fundido em um conversor. A primeira aplicação de sopro de oxigênio através de uma lança refrigerada foi na década de 1940, na Suíça. Em 1947, o primeiro conversor piloto foi desenvolvido com sucesso e começou a operar em 1948 (SOUZA, 2016; SILVA 2011).

O processo LD, foi rapidamente introduzido no Brasil por meio da Cia. Siderúrgica Belgo Mineira, cujo LD da usina de João Monlevade começou a operar em 1957, menos de cinco anos após a de Linz. Em 1963 iniciaram as operações nas fábricas da Cia Siderúrgica Mannesman em Belo Horizonte e Usina Siderúrgica Intendente Câmara na Usiminas em Ipatinga. Na sequência, a aciaria LD da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) começou a operar em 1965. (SILVA, 2011; RIZZO, 2006; MOURÃO *et al*, 2007).

Os processos predominantes para a produção de aço no Brasil e no mundo são os refinamentos do ferro gusa (líquido ou sólido) em convertedores a oxigênio e a fusão/refino de sucatas em fornos elétricos a arco. Esses métodos de fabricação de aço podem ser divididos em dois principais processos de acordo com o tipo de processo: BOF (Forno básico a oxigênio), que emprega conversores a oxigênio, e EAF (Forno elétrico a Arco), que utiliza fornos de arco elétrico (PEDROSA, 2010; BRANCO, 2004). No Brasil, esses processos são responsáveis por aproximadamente 75,1% e 23,9% da produção total de aço, respectivamente, conforme indicado na Tabela 3. Esses números também refletem a proporção correspondente de geração de escória.

Tabela 3 - Produção de aço Bruto por processo de aciaria em 2022 no Brasil

| Processo de Aciaria | 10 ³ t |
|---------------------|-------------------|
| Oxigênio (BOF) | 25.608 |
| Elétrico (EAF) | 8.107 |
| EOF | 374 |

| | |
|-------|--------|
| TOTAL | 34.089 |
|-------|--------|

Fonte: Instituto Aço Brasil, 2023.

Os conversores a oxigênio são normalmente usados para produzir grandes volumes de aço. Este é o processo de produção de aço mais utilizado (SOUZA, 2016). A Tabela 4 mostra a produção brasileira em relação ao mundo e América latina nos últimos anos, colando o Brasil como o nono maior produtor de aço bruto no mundo.

Tabela 4 - Siderurgia brasileira e mundial

| Produção de aço Bruto (10 ⁶)t | 1990 | 2000 | 2010 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
| Mundial - A | 770,5 | 848,9 | 1.433,4 | 1.880,4 | 1.951,9 | 1.834,1 |
| América Latina - B | 38,2 | 56,1 | 61,7 | 56,0 | 64,7 | 54,9 |
| Brasil - C | 20,6 | 27,9 | 32,9 | 31,4 | 36,1 | 34,1 |
| C/A (%) | 2,7 | 3,3 | 2,3 | 1,7 | 1,8 | 1,8 |
| C/B (%) | 53,9 | 49,7 | 53,3 | 56,1 | 55,8 | 56,9 |

Fonte: Aço Brasil, 2023.

A produção de aço a partir do refino do gusa não se limita ao processo LD convencional, além dos processos tradicionais, novos métodos de sopro de oxigênio foram desenvolvidos. Geralmente, esses processos são denominados de processo com sopro combinado, que consistem em ventaneiras no fundo refratário do conversor com a introdução de vários tipos de gases inertes e não inertes.

No processo LD com sopro combinado, o oxigênio é introduzido de diversas formas: por cima, pelo fundo ou em combinação. Isso permite reações mais rápidas e completas, reduzindo o teor de FeO na escória e minimizando as perdas térmicas em comparação com o processo convencional. Essas técnicas resultam em reações mais rápidas e completas, menor teor de FeO na escória e redução das perdas térmicas em comparação com o processo LD convencional. (MOURÃO *et al*, 2007; SILVA, 2011).

As principais matérias-primas utilizadas são o gusa líquido, gusa sólido, sucatas de aço e ferro fundido, cal, fluorita e oxigênio. O gusa líquido e o gusa sólido são fontes de ferro, enquanto as sucatas de aço e ferro fundido, além de fonte de ferro atuam como refrigerante. A cal é utilizada como um agente fundente, auxiliando na formação da escória e na remoção de impurezas. A fluorita é adicionada para

auxiliar na redução da viscosidade da escória. O oxigênio é introduzido para realizar a oxidação do carbono, fósforo e silício presentes no gusa, promovendo a redução do teor de carbono e o refinamento do aço. Calcário e outros fundentes, como dolomita bruta, podem ser usados (BRANCO, 2004; RIZZO, 2006; MOURÃO *et al*, 2007; SILVA, 2011).

O gusa líquido corresponde a aproximadamente 80% da carga metálica utilizada no processo, enquanto o restante é composto por sucata. A energia empregada nesse sistema é proveniente da reserva térmica no gusa líquido e pelas reações exotérmicas. Durante o processo de fabricação do aço os convertedores reduzem os teores de carbono do gusa de 4% para 1% ou teores menores, além de outros elementos como silício, manganês, enxofre ou fósforo (GONÇALVES, 2014; SOUZA, 2016).

No conversor LD, a adição de cal é essencial para que ocorra a escorificação da sílica formada pela oxidação do silício presente na carga metálica e para remover o fósforo e o enxofre, sendo este último com menor eficiência. Uma quantidade adicional de CaO e/ou MgO é necessária para minimizar o desgaste do refratário causado pelo SiO₂. É importante que o SiO₂ esteja presente na escória na forma de silicatos complexos de cálcio e ferro. (MOURÃO *et al*, 2007; SOUZA, 2016).

O desempenho metalúrgico do processo depende, em grande parte, da qualidade dos principais óxidos da escória, que são o CaO e o MgO. Essa qualidade está diretamente relacionada ao calcário primário utilizado, às condições de calcinação e ao processamento subsequente. (MOURÃO *et al*, 2007).

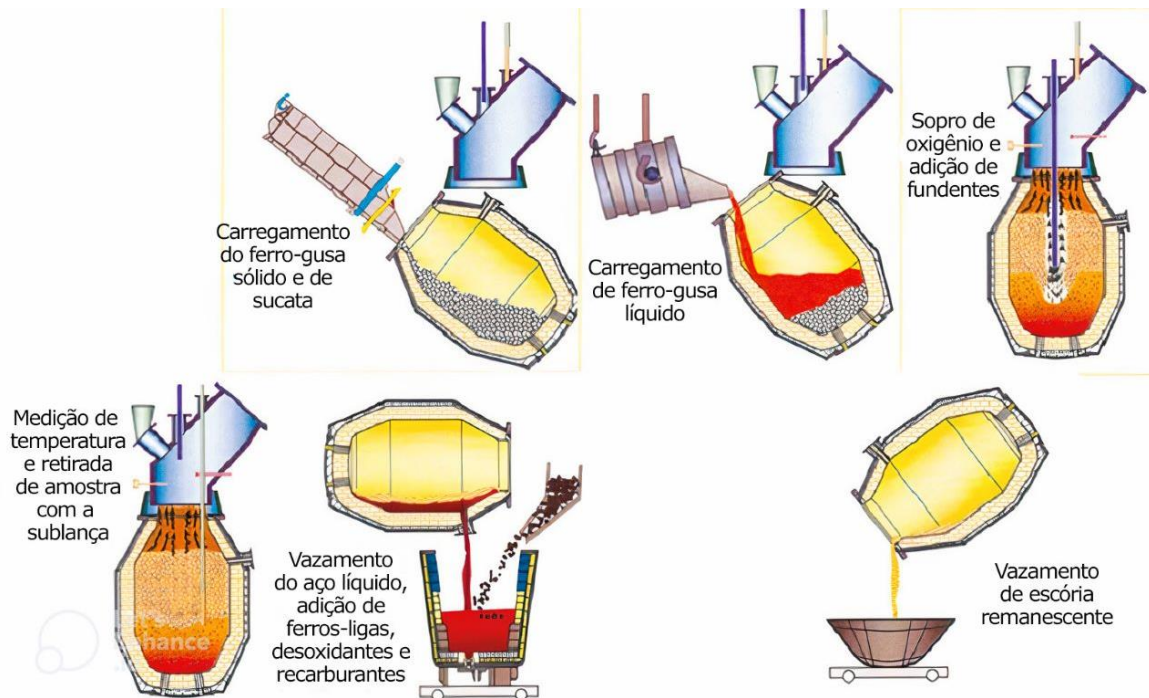
3.1.1 Ciclo do Conversor

O ciclo de operações, segundo MOURÃO *et al*, 2007; SOUZA, 2016, é dividido nas seguintes etapas de refino no conversor LD, conforme ilustradas na Figura 1, destacam-se as fontes de matérias primas para abastecimento do conversor, e a transformação do gusa em aço através das etapas de refino e por fim o vazamento.

- Carregamento de cargas sólidas;
- Carregamento de gusa líquido;

- Sopro;
- Medição de temperatura e amostragem;
- Vazamento de aço e;
- Vazamento de escória.

Figura 1 - Sequência de operação do conversor LD



Fonte: RIZZO, 2006.

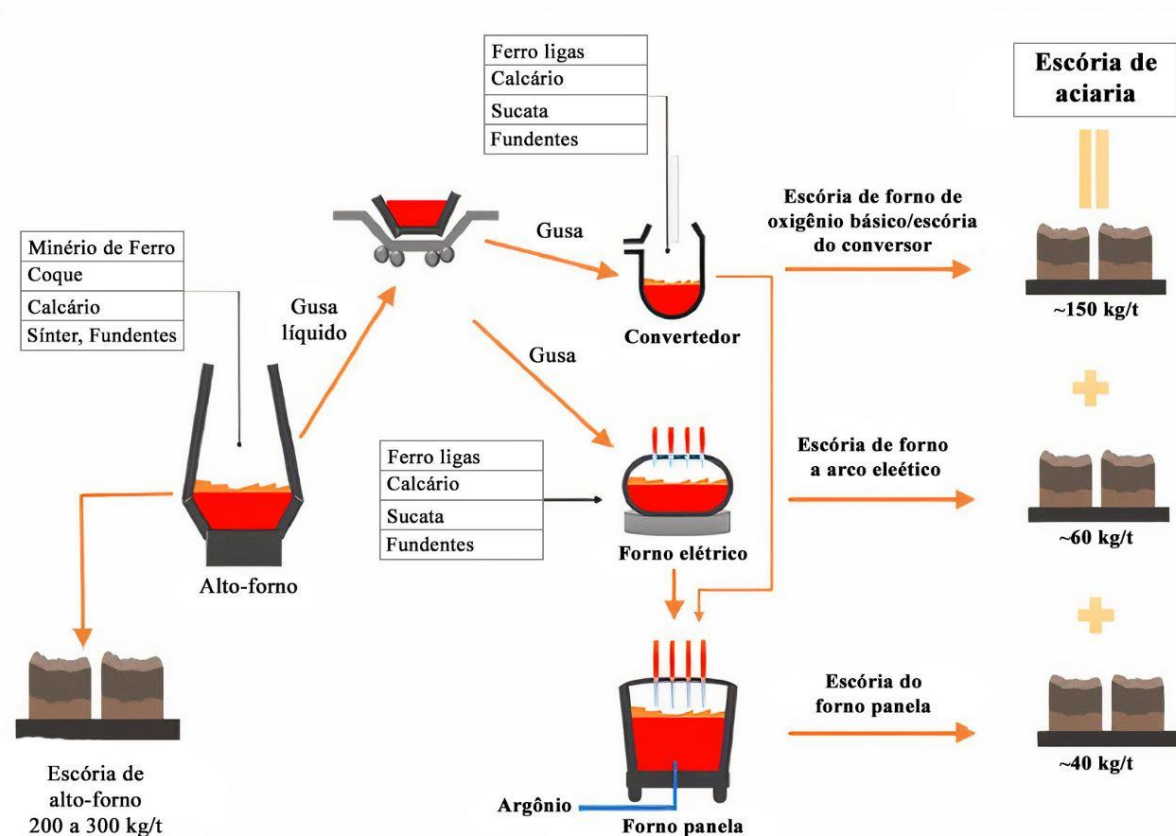
3.2 Características da escória de aciaria

A escória de aciaria desempenha um papel importante como receptadora dos elementos indesejáveis presentes no banho metálico. Sua função é agir como um reservatório oxidante, dissolvendo esses elementos sem se combinar com eles. Além disso, a escória controla o contato do metal com o oxigênio do ar atmosférico, impedindo a transferência de hidrogênio, nitrogênio e oxigênio para o metal. Dessa forma, a escória de aciaria desempenha um papel fundamental na purificação e proteção do metal durante o processo de produção (SILVA, 2016).

Para a fabricação do aço, seja por meio do processo a oxigênio ou EAF, é essencial adotar o procedimento adequado para o processamento da escória após o resfriamento e estocagem. Isso possibilita obter uma ampla variedade granulométrica de agregado de escória, os quais apresentam variações significativas

em suas propriedades físicas e químicas. É importante considerar a origem da escória ao utilizar esses agregados. Com o uso das tecnologias de produção do aço, são geradas escórias de aciaria com diferentes características, portanto, para entender seu comportamento é necessário observar o processo de fabricação do aço e a formação destas escórias. A Figura 2 mostra de forma simplificada os principais processos de produção do aço e as respectivas etapas em que as escórias são produzidas (MASUERO, MOLIN, VIELA, 2004; SOUZA, 2007; SILVA, 2016).

Figura 2 - Processos de produção de gusa e de aço e suas respectivas etapas de geração de escória



Fonte: Adaptado de: SHU; SASAKI, 2022.

A formação da escória é um processo que envolve principalmente as reações de oxidação de elementos como Si, Mn e Fe, juntamente com a dissolução da cal. Além disso, a escória contém outros componentes, tais como Al_2O_3 , Cr_2O_3 e TiO_2 , que são formados pela adição ou oxidação de elementos secundários presentes na carga metálica. O MgO é originado pelo consumo de refratários ou

aditivos, o CaF_2 é proveniente da fluorita adicionada, enquanto o P_2O_5 e o S resultam dos processos de desfosforação e dessulfuração. Além disso, a dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) é adicionada para proteger o refratário do forno. A escória é o produto resultante da combinação desses elementos durante o processo (MOURÃO et al, 2007; SOUZA, 2016; BARBOSA, 2013).

A tabela 05 apresenta uma composição química típica de uma escória de aciaria para uma produção no mesmo dia, onde a composição química de uma determinada escória pode variar o óxido de cálcio (CaO) de 30,0% a 60,0%, óxido de ferro (FeO) de 0,0% a 35,0% e de 15,0% a 30,0% de dióxido de silício (SiO_2), sendo no Brasil produzidas aproximadamente 150kg de escória de aciaria por tonelada de aço (PEDROSA, 2010; BRANCO, 2004; Silveira, 2004).

Tabela 5 - Composição química típica da escória LD granulada

| Óxidos | CaO | FeO | SiO_2 | MgO | MnO | Al_2O_3 | CaF_2 | P_2O_5 | TiO_2 | Cr_2O_3 |
|--------|-------|-------|----------------|-------|------|-------------------------|----------------|------------------------|----------------|-------------------------|
| (%) | 40,15 | 24,73 | 10,24 | 10,56 | 7,16 | 1,7 | 2,27 | 1,77 | 0,5 | 0,7 |

Fonte: GUMERI, 2004.

Um dos principais objetivos no refino LD é a formação rápida de uma escória reativa rica em CaO. A evolução da composição dos materiais deve seguir um caminho adequado para permitir a emulsificação adequada e minimizar o risco de projeções. À medida que o volume de silício oxidado aumenta, a sílica produzida começa a dissolver na cal e, à medida que o volume da escória aumenta, começam as reações na emulsão na escória produzida (MOURÃO et al, 2007).

Ao término da oxidação do silício, ocorre um aumento de temperatura que propicia a formação de uma emulsão composta por metal, gás e escória. Essa condição cria um ambiente propício para que ocorra a descarburagem, que se torna a reação mais significativa nesse contexto. Vale ressaltar que a velocidade da descarburagem é limitada pela quantidade de oxigênio disponível (MOURÃO et al, 2007).

A maioria das reações que ocorrem são exotérmicas, o que significa que liberam calor, especialmente as reações de oxidação do silício e manganês. Isso resulta em um aumento significativo da temperatura no banho (MOURÃO et al, 2007).

Na fase final do sopro, à medida que diminui a taxa de descarburização, o excesso de oxigênio oxida o ferro e o manganês, cujas massas na escória, principalmente o óxido de ferro, apresentam um grande aumento, à medida que diminui o teor de carbono no banho.

As impurezas do processo que formam a escória incluem silicato de cálcio (CaSiO_3), óxido de silício (SiO_2), ferrita de cálcio (CaFe_2O_4), óxido de magnésio (MgO) e outros. O alto teor de CaO e MgO livre na escória é devido à precipitação desses elementos além do limite de solubilidade da escória após a oxidação do fósforo e do silício (BRANCO, 2004).

Além da fase não metálica, a escória também contém uma grande quantidade de partículas de aço ou ferro metálico, que são misturadas à escória durante o sopro de oxigênio. Essas partículas podem causar instabilidade volumétrica da escória, aos produtos gerando a corrosão e oxidação a partir do ferro metálico residual (RIZZO, 2006).

A escória de aciaria é uma das maiores classes de coprodutos produzidos nas siderúrgicas, seu aproveitamento não é maior devido à competição com produtos naturais, com elevados custos de frete, necessidade de regulamentação e padronização (MOURÃO *et al*, 2007).

Para cada tonelada de aço líquido processado, são produzidos entre 100 e 150 kg de escória no refino primário e, do ponto de vista tecnológico, os aspectos relacionados ao seu uso são o controle da expansão (BRANCO, 2004; MOURÃO *et al*, 2007).

No ano de 2022, a quantidade de aço bruto produzida no Brasil foi ligeiramente superior a 36 milhões de toneladas, enquanto a produção mundial foi de 1951 milhões de toneladas, gerando 5,4 e 292,6 milhões de toneladas de escória, respectivamente. Isso significa que o Brasil é responsável por 1,8% da escória gerada no mundo. É importante destacar que, se forem utilizadas adequadamente, essas escórias podem reduzir o uso de matérias-primas em certos setores da indústria. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2023).

Após o processamento, a escória siderúrgica torna-se coproduto, que é definido como um material não metálico, inerte ou reativo dependendo do grau em que o material foi curado, podendo ou não ser classificado como agregado graúdo/bruto (PEDROSA, 2010).

O termo escória de aciaria curada geralmente se refere à escória que não apresenta risco de expansão, por ficar armazenada por no mínimo seis meses, embora algumas literaturas indiquem um ou até dois anos, o tempo não é o único fator responsável por estabilizar a escória. As substâncias que realizam essa estabilização são a água e o ar atmosférico, que converte os óxidos de CaO e MgO livres em hidratos estáveis através da reação da hidratação (SILVEIRA, 2004).

3.2.1 Expansibilidade

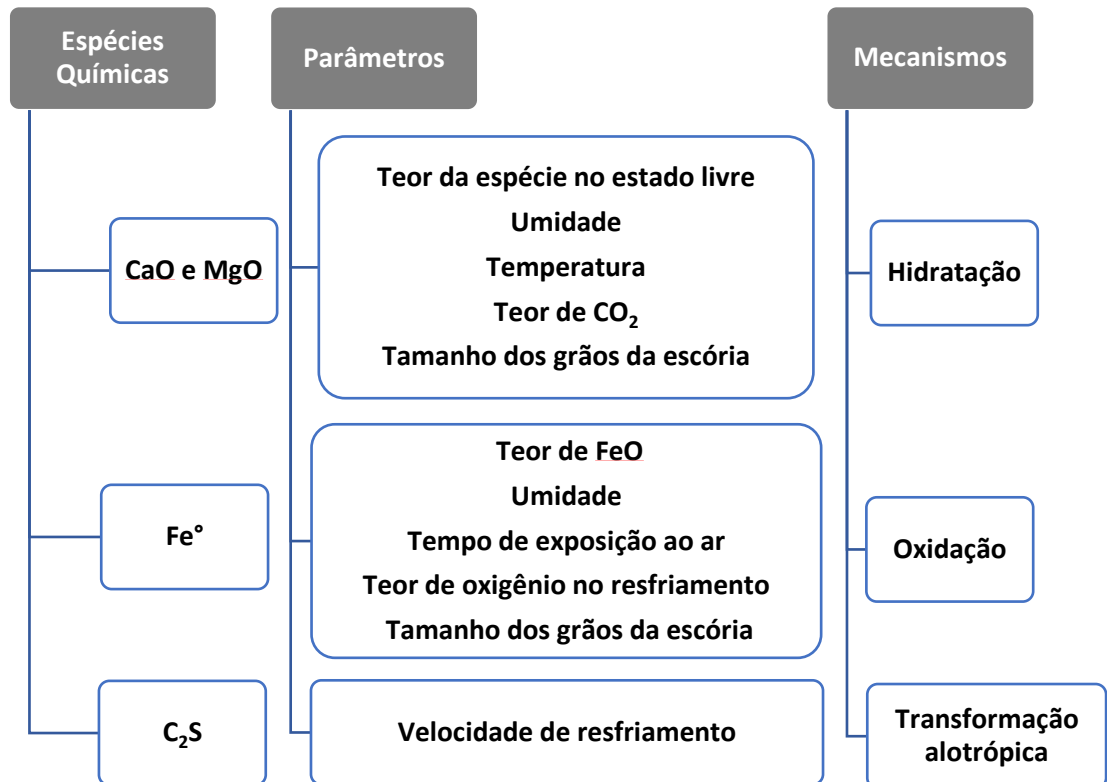
A escória de aciaria pode expandir até 10% causando danos durante a sua aplicação e tornando sua utilização um gargalo. Os defeitos provocados pela utilização incorreta podem ser identificados através de trincas, estufamentos entre outros. O contato com a água provoca reações de hidratação e eventualmente a expansão (PEDROSA, 2010; FERNADES, 2013).

Uma das principais considerações ao avaliar o uso da escória de aciaria é a quantidade de óxido de cálcio (CaO) livre e óxido de magnésio (MgO) livre presentes. De acordo com a literatura técnica, esses compostos são os principais responsáveis pelas propriedades expansivas do material. Portanto, é essencial medir cuidadosamente os teores desses componentes antes de utilizar a escória de aciaria, a fim de garantir um desempenho adequado e evitar problemas futuros.

Embora os teores de óxido de cálcio e óxido de magnésio sejam fatores cruciais para avaliar a instabilidade volumétrica das escórias de aciaria, sabe-se que outros fatores também podem contribuir para esse problema. Por exemplo, a granulometria da escória pode afetar sua capacidade de compactação e sua reatividade com outros materiais presentes no pavimento. Além disso, a presença de impurezas como sulfetos, pode gerar reações químicas indesejadas e comprometer a estabilidade do material. Portanto, é importante considerar diversos fatores ao avaliar a adequação da escória de aciaria para uso em pavimentos (PEDROSA, 2010).

Como exemplificado na Figura 3, é viável e possível agilizar o processo de cura da escória de aciaria, resultando em uma significativa redução de sua expansibilidade, quando se tem um entendimento claro dos principais mecanismos responsáveis por essa expansibilidade.

Figura 3 - Fatores e mecanismos que promovem a expansibilidade da escória de aciaria



Fonte: Adaptado de: PEDROSA, 2010.

O processo de cura da escória pode ser obtido realizando o controle de sua expansibilidade evitando danos quando aplicadas, sendo assim, algumas medidas podem ser adotadas para seu tratamento. A redução da granulometria aumentando a superfície de contato com a umidade, aumentando a hidratação e o aumento da umidade nas pilhas de estocagem (PEDROSA, 2010).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2020), apenas 63% dos agregados siderúrgicos de aciaria foram utilizados de forma proveitosa. Dentre esses, 23% foram destinados à venda externa, 13% foram utilizados internamente e 27% foram doados. Os outros 37% compõem o estoque passivo e à deposição final.

A escória de aciaria retém parte da cal virgem utilizada, que pode se expandir quando exposta ao ar devido à hidratação, fazendo com que a escória se decomponha posteriormente do material ao qual é aplicada e causar rachaduras (GEYER, 2001; GRAFFITI, 2005). A expansão também pode estar relacionada ao polimorfismo do silicato dicálcico e à oxidação e corrosão do ferro metálico (RIZZO, 2006; GUMERI, 2002; GUMERI, 2004).

Como nem todos os compostos de expansão possuem técnicas de quantificação adequadas, com exceção da cal livre, sua medição é frequentemente utilizada como forma de avaliar o potencial de expansão dessas escórias (GRAFFITI, 2005).

A quantidade de cal livre pode variar dependendo da escória, de 1 a 15%. Alguns autores também mencionam que alguns países consideram seguro o uso de escória com teor de cal livre de 4 a 7% quando utilizada em revestimentos granulares. O método mais comum de reduzir esse fenômeno ao mínimo é o envelhecimento da escória no pátio, regando-a com água, natural ou aquecida (GEYER, 2001; SOUZA, 2016). Quando líquidas, podem ser tratadas alterando o processo de resfriamento, com o objetivo de estabilizar a expansão e melhorar seu desempenho (GUMERI, 2004). Estes e outros métodos de tratamento serão apresentados posteriormente.

Está comprovado que o armazenamento da escória de aciaria ao ar sem irrigação não é garantia, e as pilhas de escória devem ter altura máxima de 1,5-2 metros. O tempo de armazenamento depende do teor de cal livre e pode variar de três meses a um ano, embora alguns países utilizem escória fresca para certas aplicações. Por meio de alguns testes físicos e de expansão, é possível investigar a relação entre a desintegração e a expansão com o teor de cal livre na escória. Em todos os casos, concluiu-se que o teor crítico de expansão está em torno de 4 a 5%, no qual a deterioração dos materiais secos (agregados) se acelera. Por outro lado, os limites estabelecidos para danos no produto em que a escória é aplicada variam entre 2% e 3% tanto em termos de desintegração como de expansão. Em casos que se aplica a escória junto a outros materiais, o limite aos danos que podem ocorrer no produto deve ser reduzido para 1%. (GEYER, 2001).

A reação de hidratação do MgO é muito mais lenta que a do CaO. A cal livre hidrata rapidamente, causando grandes mudanças de volume em um curto

período de tempo (semanas), enquanto o MgO livre hidrata lentamente, causando mudanças de volume que podem levar anos para se manifestar. Entretanto, a presença de magnésia não ligada é uma preocupação porque é impossível prever quando e em que medida essa reação ocorrerá (BRANCO, 2004).

A Figura 4 ilustra a utilização da escória de aciaria que não recebeu o tratamento adequado antes da utilização em uma pavimentação, resultando na hidratação dos óxidos presentes (CaO, MgO e outros) causando a deterioração do asfalto aplicado.

Figura 4 - Pavimento com a utilização de escória não curada (expandida)



Fonte: SILVEIRA, 2004.

Existem vários fatores que contribuem para a instabilidade volumétrica da escória de aciaria, além dos teores de CaO e MgO. Um desses fatores é a carbonatação do Ca(OH)_2 , que pode resultar na formação de carbonato de cálcio (aragonita ou calcita) e um aumento de volume em relação ao hidróxido de cálcio e da dolomita, conforme a Tabela 6 (GUMERI, 2002; PEDROSA, 2010).

Tabela 6 - Constantes físico-químicas das reações de hidratação e carbonatação do CaO e do MgO.

| Composição Química (g/mol) | Massa Molecular (g/mol) | Densidade (ml/mol) | Volume Molar (ml/mol) | Transformação Química | Mudança Volume molar (%) |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|--|--------------------------|
| CaO | 56,08 | 3,37 | 16,642 | CaO - CaO(OH) ₂ | 90,03 |
| CaO(OH) ₂ | 74,1 | 2,343 | 31,623 | CaO(OH) ₂ - CaCO ₃ | 16,75 |
| CaCO ₃ | 100,09 | 2,711 | 36,92 | CaO - CaCO ₃ | 121,87 |
| MgO | 40,32 | 3,58 | 11,264 | MgO - MgO(OH) ₂ | 117,22 |
| MgO(OH) ₂ | 58,34 | 3,385 | 24,462 | - | - |

Fonte: RAMACHADRAN, 1969 apud GUMERI, 2002.

Outro fator é a desintegração devido à transformação de fase do silicato dicálcico, que pode contribuir para a expansão da escória de aciaria LD. Embora essa transformação não cause grandes alterações de volume, ela pode agravar os efeitos gerais da expansibilidade causada pelo CaO e pelo MgO. A alotropia é um fenômeno em que certos elementos podem apresentar-se sob formas diferentes e com propriedades diferentes, como é o caso da transformação alotrópica do silicato dicálcico. A oxidação ou corrosão do ferro metálico presente na escória de aciaria LD também pode gerar expansão, embora com menor efeito global do que a expansão causada pelo CaO e pelo MgO. Em média, o teor de ferro total na escória LD representa de 15 a 20% de sua composição. É importante considerar todos esses fatores ao avaliar a adequação da escória de aciaria para uso em pavimentos e garantir um desempenho satisfatório (PEDROSA, 2010).

O CaO possui propriedades higroscópicas, o que significa que é capaz de absorver umidade do ambiente circundante. Isso resulta em reações rápidas de hidratação, em que a água penetra na superfície dos poros da escória de aciaria, liberando calor como resultado da reação de hidratação. Essa liberação de calor, juntamente com a formação de produtos de hidratação, pode gerar forças internas de expansão dentro da escória. Essas forças podem levar à formação de fraturas e à desintegração da estrutura da escória, prejudicando sua estabilidade e resistência.

Portanto, é importante considerar essas propriedades do CaO ao utilizar a escória de aciaria em aplicações específicas, a fim de evitar problemas relacionados à expansão e à deterioração do material (GUMERI, 2002).

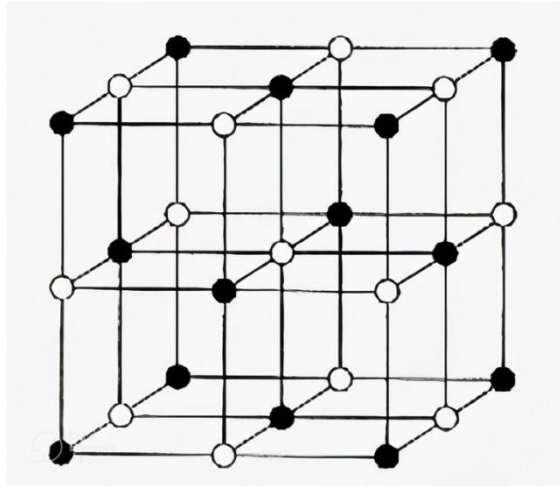
3.2.2 Expansão de CaO e MgO

Muitos pesquisadores estudaram o efeito da cal livre e dos óxidos de magnésio que não reagiram nas reações expansivas da escória de aciaria; esses estudos dizem respeito principalmente à escória LD devido ao alto nível de CaO livre que geralmente está presente (GUMERI, 2002; PEDROSA, 2010).

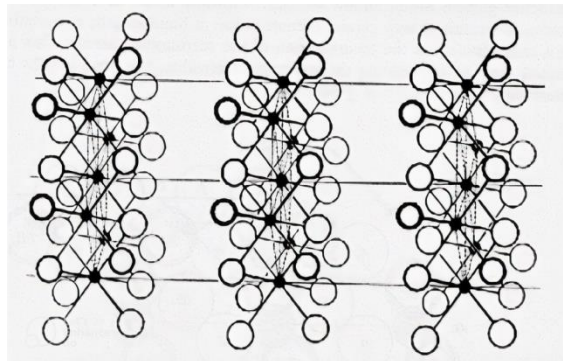
O óxido de cálcio livre presente na escória de aciaria é um fator de instabilidade devido à sua conversão em hidróxido de cálcio, que pode causar expansão volumétrica ao mesmo tempo em que degrada o material. Ao medir o pH em uma solução aquosa da escória de aciaria, é possível observar uma variação de 8 a 12. No entanto, esse valor pode ser ainda maior no lixiviado da escória. Quando esse lixiviado entra em contato direto com certos materiais, pode causar corrosão devido à sua alta alcalinidade. Portanto, é importante considerar os efeitos corrosivos do lixiviado da escória ao utilizá-la (ROHDE, 2002; SOUZA, 2007).

O CaO tem um sistema de cristal cúbico no qual cada íon de Ca é cercado por átomos de oxigênio para formar um octaedro regular, conforme apresentado na Figura 5. O Ca(OH)_2 apresenta um sistema cristalino hexagonal e tem uma estrutura estratificada com duas folhas de OH paralelas ao plano basal e com uma lâmina de íons de Ca entre elas, estando cada Ca entre seis OH, a estrutura do Ca(OH)_2 é apresentada na Figura 6. O hidróxido de cálcio é comumente referido com o nome mineral portlandita (GUMERI, 2002).

Figura 5 - Sistema cristalino CaO

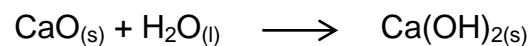


Fonte: GUMERI, 2002.

Figura 6 - Sistema cristalino e Ca(OH)_2 

Fonte: GUMERI, 2002.

O processo de hidratação com CaO prossegue de acordo com a seguinte reação:



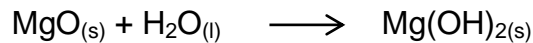
Segundo Hohde 2002, este pode ser o principal fator responsável pela expansão da escória de aciaria, existem estudos para determinar o critério de classificação para aplicação da escória.

Pôde ser observado que faixas menores que 7% não são prejudiciais a durabilidade de pavimentos que utilizam a escória de aciaria. Também existem estudos que limitam este teor de cal livre presente na escória ente 4 e 5% (ROHDE, 2002).

Quando a escória de aciaria contém CaO livre e é exposta à umidade, pode ocorrer a formação de tufa, resultando em expansão de até 14%. A porosidade das partículas, quantidade de água e CO₂ presente na atmosfera aceleram essas reações. A instabilidade da escória depende da quantidade e forma do óxido de cálcio livre, que pode estar presente de forma pura ou em solução sólida com ferro (SOUZA, 2007; BARBOSA, 2013; MASUERO, MOLIN, VIELA, 2004).

Na utilização da escória, os componentes mais importantes são o CaO e o MgO livres, e a estabilidade volumétrica depende de seus teores presentes. Quanto maior a quantidade desses óxidos, mais instável é a escória. O CaO tem uma hidratação rápida, causando alterações no volume em questão de semanas, enquanto o MgO leva mais tempo para se hidratar, podendo levar anos. Essa expansão resulta na desintegração dos agregados presentes na escória e na perda de resistência do componente onde ela é aplicada (SOUZA, 2007).

O uso de cal dolomítica e o consumo do revestimento de forno no processo de refino do aço são responsáveis pela presença de óxido de magnésio na escória, que em contato com umidade se hidrata lentamente na forma de hidróxido de magnésio ou brucita, conforme equação abaixo:



O teor de magnésio na escória de aciaria pode variar até 10%. Pode ser na forma livre, como na periclásio (MgO), propício a expansão, ou quimicamente combinado em solução sólida com outros elementos, geralmente apresentando comportamento estável (ROHDE, 2002).

Os sistemas cristalinos do MgO (periclásio) e do Mg(OH)₂ (hidróxido de magnésio ou brucita) são similares aos do CaO e do Ca(OH)₂, respectivamente (GUMERI, 2002).

A literatura mostra que o uso adequado da escória de aciaria depende não apenas do teor de CaO livre, mas também do tamanho e forma dos grãos. Grãos finos têm maior área superficial e uma cura mais rápida ao entrar em contato com a umidade. O MgO tem uma reação de hidratação menor em comparação com o CaO, e a formação de tufa pelo MgO é mais lenta, levando anos.

3.2.3 Expansão em função do polimorfismo do silicato de dicálcio

A composição mineralógica da escória de aciaria é influenciada pelo processo de produção de aço e pela forma como ocorre o resfriamento. Esses fatores contribuem para a formação de compostos cristalinos, como o silicato dicálcio ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), ferrita dicálcica ($2\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$), merwinita ($3\text{CaO}.\text{MgO}.2\text{SiO}_2$), aluminato de cálcio ($\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) e uma quantidade considerável de CaO e MgO (periclásio) livres (SOUZA, 2007).

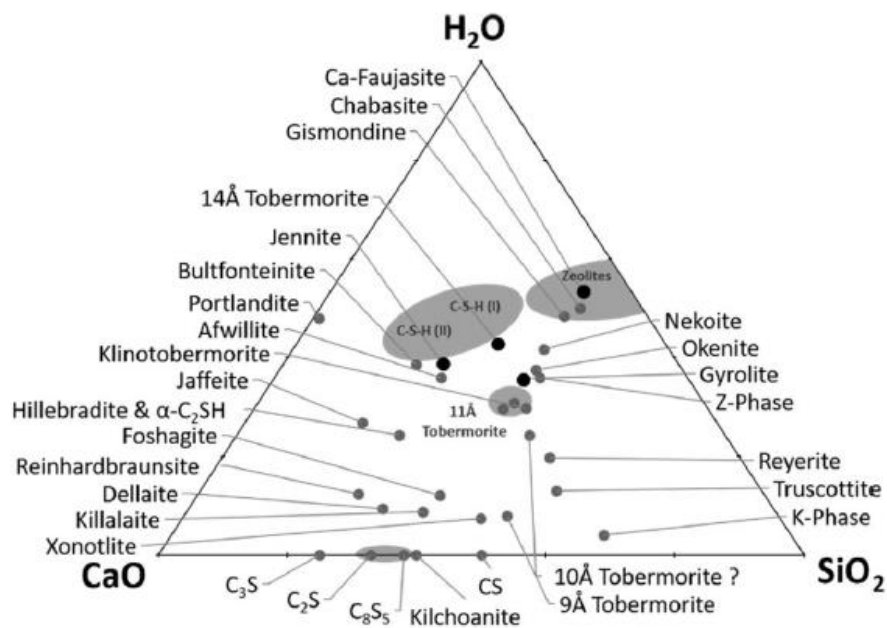
A quantidade de CaO presente na escória de aciaria está diretamente relacionada à sua basicidade. A basicidade é medida pela razão entre CaO e SiO_2 na escória. Quando a escória apresenta uma basicidade elevada, os teores de óxidos livres tendem a se estabilizar com maior facilidade. Quanto maior for essa razão, maior será a formação de silicatotricálcio, o que resulta em um aumento da quantidade de CaO livre quando ocorre a dissociação (PEDROSA, 2010).

O silicato dicálcico, também conhecido como ortosilicato de cálcio ou C_2S , é um componente encontrado em cimentos e escórias. O C_2S possui quatro fases polimórficas, que são $\alpha\text{C}_2\text{S}$, $\alpha'\text{C}_2\text{S}$, $\beta\text{C}_2\text{S}$ e $\gamma\text{C}_2\text{S}$, seguindo uma sequência específica de acordo com o resfriamento. A forma estável do C_2S é influenciada pela presença de outras substâncias e pela taxa de resfriamento. Quando resfriado rapidamente, o C_2S mantém sua estabilidade indefinidamente. Isso significa que o resfriamento rápido favorece a formação e a manutenção da fase estável do C_2S (GUMERI, 2002).

O silicato dicálcico também é de grande importância no fenômeno de instabilidade da escória de aciaria. Na forma beta (larnita), pode sofrer reações de hidratação, passando para a fase sigma (calco-oliviana). Essa transformação é problemática porque a transição de beta para sigma durante o resfriamento ou mesmo à temperatura ambiente provoca um aumento de volume, causando o fenômeno de esfrelamento. O C_2S tem uma reação mais lenta com a água e um baixo calor de hidratação comparada à CaO. No entanto, com o passar do tempo, ele alcança a mesma resistência mecânica que o C_3S (ROHDE, 2002; SOUZA, 2007).

As propriedades do C-S-H determinam sua capacidade de acelerar a hidratação do cimento, a maioria das propriedades são determinadas pela sua estequiometria. A Figura 7 demonstra a relação de referência do C-S-H para formação de portlandite, C_2S e C_3S . Durante a pesquisa de Jhon e Stephan (2018) foram encontrados em várias publicações, em que o número de partículas C-S-H, muitas vezes descrito pela quantidade total ou superfície total adicionada foi identificado como o parâmetro crucial para seu desempenho.

Figura 7 - Diagrama ternário CaO-SiO₂-H₂O (C-S-H)



Fonte: JHON; STEPHAN, 2018.

3.3 Métodos para ensaios de caracterização da escória de aciaria

Como em qualquer estudo de um resíduo específico, o primeiro passo é caracterizar o material, sendo assim, as características das escórias de aciaria incluem aspectos físicos, químicos, mineralógicos, microscópicos e ambientais.

No Brasil, a maioria das análises de cal livre em escórias são baseadas em técnicas para determinação desses compostos em cimento, embora exista uma norma que inclua tais técnicas aplicáveis à análise de cal livre em escórias de aciaria (GRAFFITI, 2005).

3.3.1 Caracterização física

As partículas de escória possuem uma forma acentuada e uma superfície grosseira, o que facilita seu intertravamento quando compara com agregados naturais. Além disso, apresentam uma massa específica mais elevada do que agregados naturais e um índice considerável de absorção de água. A textura porosa da escória é mais pronunciada em comparação com agregados naturais, o que a torna mais propensa a absorver umidade. Essa característica, juntamente com a presença de óxidos hidratáveis, resulta em uma grande instabilidade no volume da escória. (SOUZA, 2007).

A composição granulométrica e o tamanho máximo da escória podem ser obtidos pelo método da NBR17054 de 06/2022 - Determinação da composição granulométrica de agregados (GUMERI, 2002).

Após coletada as amostras para determinar a granulometria, elas devem ser reduzidas e misturadas de acordo com a NRB16915, e em seguida devem secar em estufas com temperaturas no intervalo 105°C para mais ou menos 5°C por 24h ou até a constância da massa e posteriormente esfriar a temperatura ambiente para a determinação da massa. A massa mínima por amostra pode ser vista na Tabela 7 onde temos a relação entre a granulometria do material e massa mínima a ser encontrada (NBR17054, 2022).

Tabela 7 - Massa mínima por amostra de ensaio

| Dimensão máxima característica do agregado (mm) | Massa mínima da amostra de ensaio (kg) |
|---|--|
| < 4,75 | 0,3 |
| 9,5 | 1 |
| 12,5 | 2 |
| 19 | 5 |
| 25 | 10 |
| 37,5 | 15 |
| 50 | 20 |
| 63 | 35 |
| 75 | 60 |

Fonte: NRR17054, 2022.

Os ensaios para determinação da densidade e da absorção de água podem ser realizados de acordo com o método NBR16916 DE 04/2021 – Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água e da massa específica de escória moída usando a NBR 6474 (1984) (NBR16605 DE 06/2017) método - cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da massa específica (GUMERI, 2002).

Na Figura 8 temos o frasco com tampa para realização do ensaio, o qual deve possuir as seguintes características; capacidade de 500 ml com variação de 25ml, até a marcação superior da tampa do frasco, considerando todo conjunto, boca do frasco com diâmetro de 50 mm com variação de 5mm e diâmetro interno do tubo da tampa de 11 mm com variação de 1 mm. Os ensaios para uma mesma amostra em um curto intervalo de tempo não podem diferir mais que 0,05 g/ cm³ para determinação da densidade e 0,5 g/ cm³ para absorção de água de agregados para absorção menor que 2%. Utilizando as equações 1, 2, 3 e 4 pode ser calculada a densidade do agregado na condição seca, densidade do agregado na condição de saturada superfície seca e absorção de água, respectivamente (NBR16916 DE 04/2021).

Equação 1:

$$\rho_s = \frac{m_A}{V - V_a}$$

ρ_s - é a densidade do agregado na condição seca, expressa em g/cm^3 .

m_A - é a massa da amostra seca em estufa expressa em g.

V - é o volume do frasco calibrado em cm^3 .

V_a - é o volume de água adicionado ao frasco em cm^3 .

Equação 2:

$$V_a = \frac{m_D - m_C}{\rho_a}$$

m_D - é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, expressa em g.

m_C - é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa da água, expressa em g.

ρ_a - é a densidade da água na temperatura do banho, expressa em g/cm^3 .

Equação 3:

$$\rho_{sss} = \frac{m_B}{V - V_a}$$

ρ_{sss} - é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca, expressa em g/cm^3 .

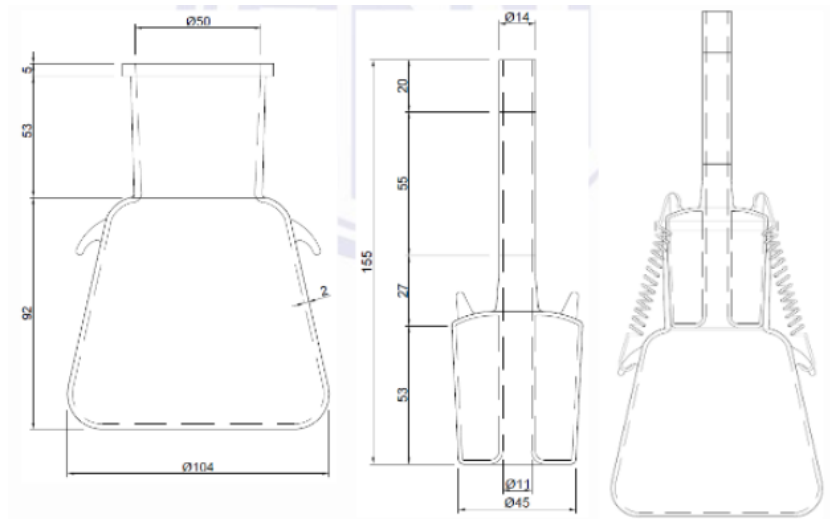
m_B - é a massa da amostra saturada superfície seca, expressa em g.

Equação 4:

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100$$

Abs - é absorção de água expressa em (%).

Figura 8 - Frasco com tampa



Fonte: NBR 16916, 2021.

Também pode ser utilizado para caracterizar a granulometria pelo método de peneiramento de acordo com DENR-ME 083/94 (ROHDE, 2002).

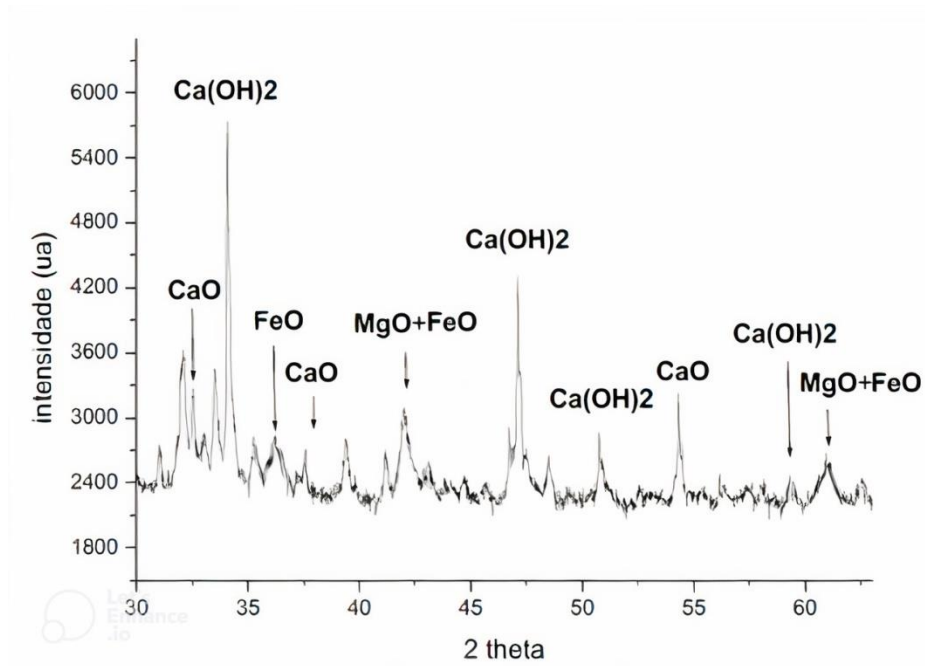
3.3.2 Caracterização química

A composição química das escórias de aciaria é representada em relação aos óxidos simples presentes nelas. A análise química pode ser utilizada para identificar a composição química da escória, o que pode fornecer informações importantes sobre sua microestrutura. A difração de raios X (DRX) pode ser utilizada para caracterizar e determinar a estrutura cristalina da escória, permitindo a identificação de suas fases (GRAFFITI, 2005; POLESE et al, 2006; GUMERI, 2004; SOUZA 2016; SOUZA, 2007).

Os planos definidos nas células cristalinas estão relacionados aos raios atômicos de cada átomo e aos tipos de ligação envolvidos. Durante a análise, a amostra exhibe picos no difratograma, que representam as distâncias interplanares dos minerais presentes. Como pode ser visto a

Gráfico 1, esses picos são obtidos através da comparação dos elétrons incididos nos ensaios e são características da difração de raios-X nos planos cristalográficos da amostra, permitindo a identificação dos principais constituintes presentes na escória de aciaria (PEDROSA, 2010).

Gráfico 1 - Registro difratométrico de uma amostra de escória de aciaria



Fonte: BOLDRINI, 2022.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV), por sua vez, pode ser empregada para examinar a morfologia e a topografia da superfície da escória em alta resolução. Através da emissão e interação de feixes de elétrons com a amostra, a difração por raios-X permite a observação e caracterização de diferentes tipos de minerais. Isso possibilita analisá-los em termos de sua morfologia e organização (PEDROSA, 2010).

A espectrometria de dispersão de energia (EDS) é uma técnica complementar ao MEV que permite a análise da composição química dos elementos presentes na amostra (GRAFFITI, 2005; POLESE et al, 2006; GUMERI, 2004; SOUZA 2016).

Ao combinar essas técnicas, é possível obter informações mais detalhadas sobre a microestrutura da escória de aciaria, como a presença de fases, a distribuição de tamanho de partículas e outras informações importantes para a compreensão do comportamento da escória em diferentes processos industriais.

Existem muitas maneiras de caracterizar a escória de aciaria e sua escolha deve levar em consideração o teor de óxido a ser obtido. Quanto menor a quantidade do componente, mais sensível deve ser a tecnologia utilizada (POLESE et al, 2006)

A maioria das fases primárias pode ser distinguida por análise microscópica, mas muitas vezes no caso de soluções sólidas, sua composição não pode ser verificada imediatamente, para esses casos a difração de raios X pode ajudar a confirmar a identificação na amostra (SOUZA, 2016).

A composição química das amostras de escória de aciaria também pode ser determinada pelo método de fluorescência de raios-X (FRX). A fluorescência de raios X é uma técnica analítica não destrutiva que se baseia na excitação de elétrons presentes nas camadas internas dos átomos na amostra por meio de raios X.

Os elementos após excitação por raios X primários emitidos pelos tubos de raios X emitem radiação característica para cada elemento (espectro característico). Esta radiação é utilizada para a identificação (análise qualitativa) e quantificação (análise quantitativa) dos elementos presentes na amostra (GUMERI, 2004; SILVA, 2016).

O teor de CaO livre na escória pode ser obtido pelo método proposto na norma NBR NM 13 (2012) - Portland Cement-Determinação de Óxido de Cálcio Livre pelo etilenoglicol (GUMERI, 2002).

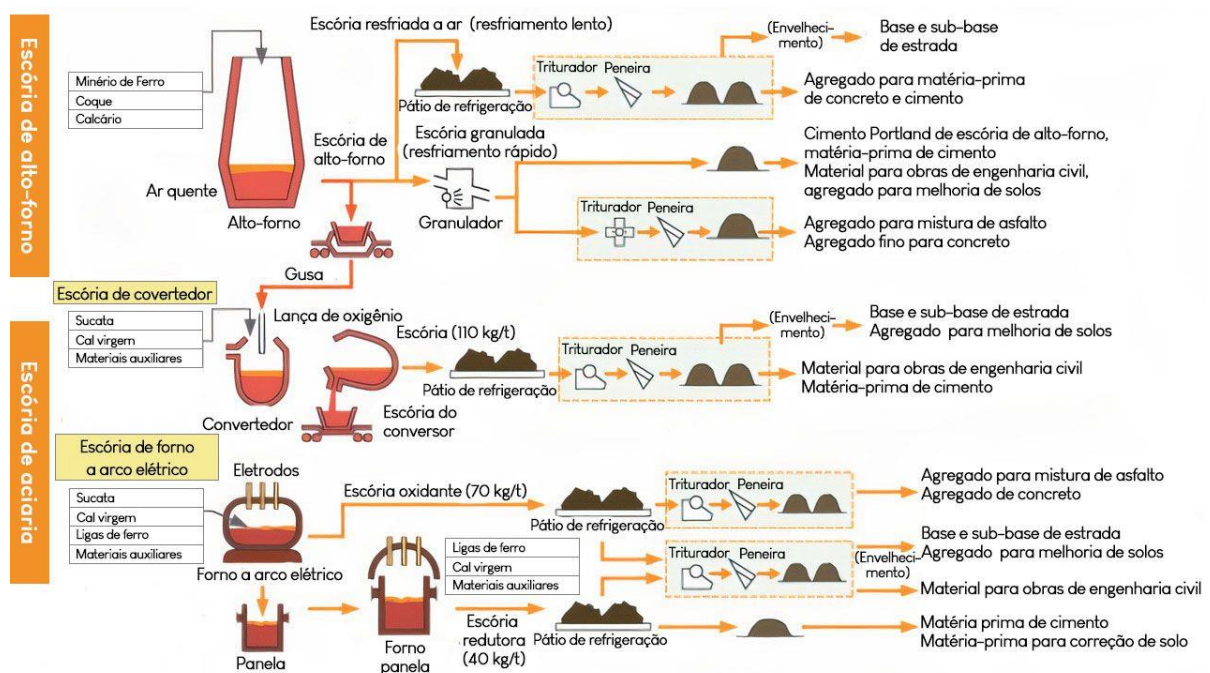
Após (SILVA, 2016) analisar as escórias provenientes dos processos LD e EAF utilizando o sistema TIMA-MIRA que é composto por um programa de controle de varredura e análise de dados minerais e um microscópio eletrônico de varredura, com canhão de elétrons de emissão de campo, associado a dois detectores de dispersão de energia de raios X característicos. Os principais elementos encontrados foram ferro, CaO, MgO, MnO e SiO₂, sendo o ferro, óxido de cálcio e a sílica predominantes. Esses elementos representaram aproximadamente 70,3% da massa total da escória BOF e 68,7% da massa da escória EAF. A presença desses elementos pode ser indesejada, dependendo da aplicação da escória, e, portanto, podem exigir tratamentos específicos, conforme abordado SILVA (2016). A utilização do sistema TIMA-MIRA possibilitou a quantificação e identificação precisa dos elementos químicos e fases presentes, contribuindo para um melhor entendimento da composição e propriedades das escórias.

3.3.3 Processamento

Segundo (SANTOS, 2022; RIZZO, 2006) o processamento convencional da escória de aciaria é realizado através das seguintes etapas representadas pela Figura 9:

- Resfriamento controlado;
- Britagem;
- Separação magnética;
- Classificação granulométrica;
- Estabilização volumétrica.

Figura 9 - Representação esquemática do processo de beneficiamento de escória, precedido de sua origem no processo siderúrgico



Fonte: Adaptado de: NIPPON SLAG ASSOCIATION, 2023.

Normalmente após serem resfriadas, as escórias de aciaria são transportadas para uma planta de beneficiamento, para que seja realizado a britagem e separação obtendo agregados grossos e finos para diferentes tipos de aplicação; é de extrema importância garantir que ela esteja livre de outros resíduos, como tijolos refratários, pedras, madeira ou qualquer outro material que possa ser incorporado à escória. O recebimento da escória no pátio é ilustrado na

Figura 10.

A parte metálica é reaproveitada no processo siderúrgico, enquanto a escória é separada de acordo com sua granulometria. O primeiro passo para sua futura utilização, é o resfriamento, britagem ou boleamento (quebra) quando necessário e separação da parte metálica da escória advinda do processo (SOUZA, 2007; GUMERI, 2002).

Figura 10 - Escória bruta de aciaria



Fonte: SOUZA, 2007.

Uma vez retirada (após o vazamento) a escória, com temperatura próxima a 1400°C é destinada para o pátio de resfriamento onde será resfriada e posteriormente processada, conforme a Figura 11. O resfriamento consiste em dispor a escória no pátio e com jatos de água para realizar o resfriamento, conforme a Figura 12, em seguida a escória resfriada ou parcialmente resfriada é despejada em um classificador onde a escória de maior granulometria contendo ou não metal é separado pela parte superior da malha, este material grosseiro passa por outro processo de classificação posteriormente para que possa retornar ao processo.

Figura 11 - Basculamento da escória de aciaria.



Fonte: RAPOSO, 2005.

Figura 12 - Resfriamento da escória de aciaria.



Fonte: RAPOSO, 2005.

Na Figura 13 mostra a planta de beneficiamento, onde a escória é direcionada através de correias transportadoras e passa por um separador magnético, onde a parte metálica é redirecionada para ser classificada de acordo com sua granulometria e teor metálico passando por outras peneiras e despejadas em baias específicas de separação. Sendo classificadas como sucata do tipo B (19 a 63 mm), sucata tipo C (06 a 19 mm) e sucata tipo D (0 a 06 mm) (BITTENCOUT, 2016).

Figura 13 - Planta de beneficiamento



Fonte: RAPOSO, 2005.

O material não metálico é direcionado para outra parte da planta de beneficiamento onde é peneirada e separada de acordo com sua granulometria. Podendo ser classificada como agradado zero (0 a 19 mm), agregado 01 (19 a 35 mm), agregado 02 (35 a 63 mm) e por fim agregado 03 (> 63 mm). Como a utilização do agradado 03 é limitada, essa parte do material é reprocessada para gerar os demais agregados. Após o processamento, a escória é submetida a ensaios como os citados anteriormente para sua caracterização.

As escórias de aciaria devem passar por algum tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos dependendo da sua aplicação, ou seja, teores de CaO, MgO, FeO_x entre outros elementos que atendam as normas de acordo com a sua utilização.

3.4 Tratamento da escória de aciaria

Para utilização da escória de aciaria pode ser necessário um tratamento que proporcione a estabilização dos óxidos expansivos, pois a aplicação inadequada desse resíduo pode gerar problemas significativos, como a degradação prematura e/ou contaminação do solo. Para contornar essas questões, utiliza-se o termo "escória curada" para se referir à escória que passou por algum tipo de tratamento para tornar sua expansão adequada à aplicação específica pretendida.

A cura consiste em tratar os elementos instáveis presentes na escória em elementos estáveis através da transformação destes em hidróxidos e/ou óxidos. Existem várias formas de tratar a escória conforma demonstrado na Tabela 8, a forma

lenta é o envelhecimento, e vários outros processos podem ser citados para cura acelerada, tais como, a cura por vapor, a cura por vapor sob pressão, a cura por adição de sílica à escória no estado líquido e outros métodos experimentais utilizados em testes específicos.

Tabela 8 - Técnicas conhecidas para o tratamento da escória de aciaria

| Tratamento | Descrição | Momento da atuação | Vantagens | Desvantagens | Eficiência |
|-------------------------------------|--|--|--|--|---------------|
| Aumento da dissolução dos fundentes | Redução da granulometria da cal/dolomita | Antes da geração | Baixo custo | Não publicado | Não publicado |
| Alteração do agente escorificante | Utilização de um material sintético como fundente | Antes da geração | Aumenta a atividade hidráulica da escória | Não altera o teor de MgO Livre | Baixa |
| Adição de sílica e oxigênio | Adição de sílica e oxigênio à escória líquida com uma fonte de calor | Após a geração com a escória no estado líquido | Redução dos teores de CaO e MgO livre para abaixo de 1% | Alto custo | Média |
| Granulação com água | Resfriamento brusco com água | Após a geração com a escória no estado líquido | Aumenta a atividade hidráulica da escória | Alteração da granulometria; necessário. secagem; problemas ambientais; friabilidade. | Alta |
| Granulação a seco | Resfriamento brusco a seco | Após a geração com a escória no estado líquido | Aumenta a atividade hidráulica da escória; Mais simples que a granulação com água. | Alteração da granulometria; friabilidade. | Alta |

| Tratamento | Descrição | Momento da atuação | Vantagens | Desvantagens | Eficiência |
|--------------------------------------|---|---|--|--|------------|
| Cura ao tempo | Exposição ao tempo - ocasionalmente com mo-lhagem | Após a geração com a escória no estado sólido | Baixo custo e simplicidade | Demorado, falta de definição metodológica; heterogeneidade. | Variável |
| Cura a vapor sob pressão atmosférica | Injeção de vapor à escória sem pressão | Após a geração com a escória no estado sólido | Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres. | Alto custo, principalmente se não há rede de vapor disponível. | Alta |
| Cura a vapor sob pressão atmosférica | Injeção de vapor à escória em autoclave | Após a geração com a escória no estado sólido | Redução considerável dos teores de CaO e MgO livres. | Alto custo | Muito Alta |

Fonte: BARBOSA, 2013.

3.4.1 Envelhecimento ou cura

Quando nenhum tratamento é aplicado a escória de aciaria no estado líquido, a escória no estado sólido é processada e armazenada em um pátio ao ar livre. Após essa etapa a escória é tratada através da exposição ao tempo em condições de temperatura ambiente, esse tratamento é conhecido como *weathering* e pode ou não seguido de jatos de água ao longo do tratamento (RAPOSO, 2005).

Neste processo de cura lenta, a escória após passar por todas as etapas de beneficiamento é estocada em pátios, com pilhas dispostas a céu aberto, tendo como principal controle o tempo e o modo de armazenamento das pilhas. Sendo assim, a escória é solidificada pelo resfriamento, beneficiada e estocada até a sua estabilização completa. Mesmo sendo um processo muito utilizado, pode ser inviável para grandes siderúrgicas, tendo em vista o volume de escória produzido e a necessidade de espaço para estocagem. O tempo necessário para cura completa da

escória pode variar de acordo com o tipo de escória gerada em função do aço produzido, portanto é necessário que sejam feitas análises ao longo do período de cura que pode variar de seis meses até dois anos. (BALTAZAR, 2001; GUMERI, 2002; FREITAS, 2018).

De acordo com (BARBOSA, 2013), o processo de cura da escória pode levar de três meses a um ano, dependendo da composição química do material. Para facilitar a cura, recomenda-se armazenar a escória em pequenas pilhas com altura reduzida, geralmente entre 1,5 e 2 metros. Outros autores sugerem que as pilhas não ultrapassem dez toneladas e que não sejam muito altas, a fim de garantir que todo o material seja tratado adequadamente. Essas medidas são adotadas para acelerar o processo de cura da escória de aciaria e torná-lo o mais rápido possível.

3.4.2 Cura com a utilização de vapor de água

Este processo consiste em acelerar a cura da escória de aciaria através da injeção de vapor de água (*spray*) em uma pilha de escória de aciaria coberta com lona e deposita em uma baia, onde o vapor permeia o leito conforme apresentado na Figura 14. O tempo de duração é de seis dias e as etapas consistem em empilhamento, cura com a injeção de vapor, resfriamento e retirada do material ((JIS A5015) – complementar, BALTAZAR, 2001).

Segundo Silveira 2004, os estudos realizados na CST com o método PMT-130 foram alcançados resultados com percentuais de expansão menores que 0,5% o que atende as DNER, onde é estabelecido que o máximo de expansão de ser de 3%.

Figura 14 - Pilha de escória sendo tratada com vapor de água.



Fonte: SILVEIRA, 2004.

BARBOSA (2013) destaca que é possível acelerar o processo de cura da escória de aciaria por meio de uma técnica específica. Ele sugere que a escória seja submetida a um *spray* de água quente, seguido pela injeção de vapor de água ou pela passagem através de uma zona de vapor. Essa abordagem, tem o potencial de promover a cura completa da escória de aciaria em um período mais curto, cerca de vinte dias.

3.4.3 Cura com vapor sob pressão ou processo SKAP (Sumitomo Kawasaki Aging Process)

O processo desenvolvido pelas siderúrgicas japonesas, Sumitomo Metal Industries Ltda. (SMI) e a Kawasaki Heavy industries Ltda. (KHI), conhecido como SKAP (Sumitomo Kawasaki *Aging Process*), representado na Figura 15, que reduz o tempo de cura da escória. O processo consiste na injeção de vapor sob pressão, proporcionando o aumento da temperatura, e a alteração da pressão acelera as reações químicas, fazendo com que o período de cura seja reduzido (BALTAZAR, 2001).

Neste processo a escória é colocada dentro de uma autoclave, onde a mesma permanece por três horas submetida a uma atmosfera de vapor de água sob pressão de 0,5 Mpa e com o final deste processo obtém-se uma escória com características similares ao método de cura com a utilização de vapor de água. O Gráfico 2 mostra a relação de expansão e o tempo em relação à pilha estocada em

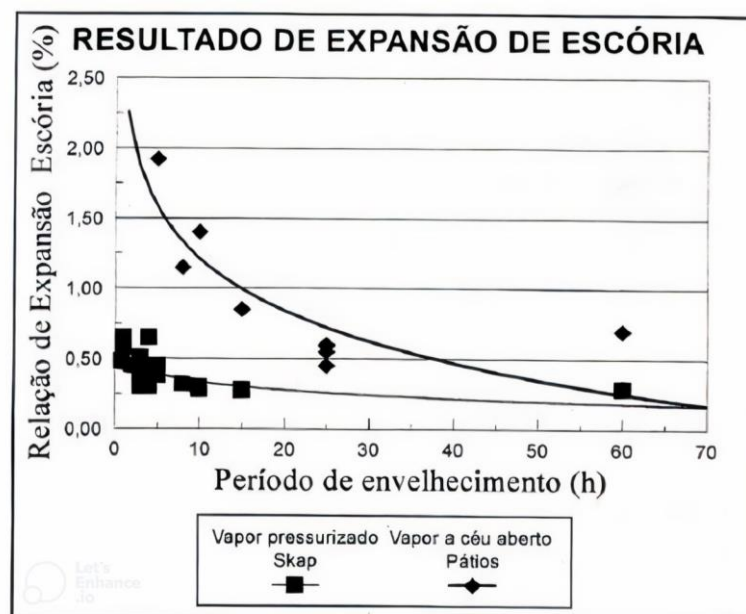
pátio a céu aberto (cura com vapor de água) e processo SKAP (cura com vapor sob pressão), onde os resultados de expansão mostram que nas primeiras horas utilizando o processo SKAP os valores de expansão que estão próximos ao valor de 0,5% e são superiores quando comparados com os resultados das amostras de escória tratadas com vapor de água (BALTAZAR, 2001, SILVEIRA, 2004).

Figura 15 - Autoclave desenvolvida pela Sumitomo e Kawasaki.



Fonte: SILVEIRA, 2004.

Gráfico 2 - Processo de cura da escória versus expansão



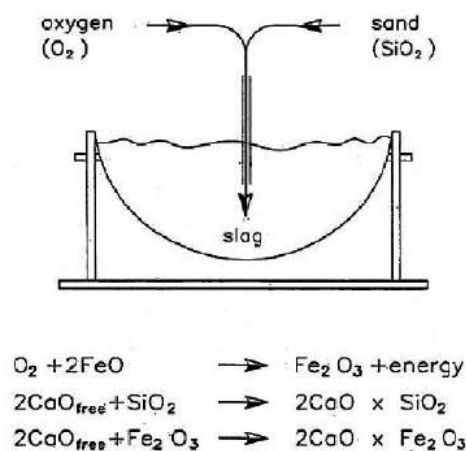
Fonte: BALTAZAR, 2001.

3.4.4 Cura por adição de sílica a escória LD no estado líquido

A escória de aciaria estando líquida pode ser tratada com a adição de aditivos para reduzir o teor de cal livre. Uma das maneiras de realizar este tratamento é utilização de uma fonte de sílica e oxigênio na escória ainda líquida; essa adição oxida o FeO promovendo uma reação exotérmica que fornecera calor suficiente ao processo. Resultando assim em uma redução no teor de cal livre devido a sua dissolução e combinação com a sílica. (GUMERI, 2002; RAPOSO, 2005).

A cura por adição de sílica à escória de aciaria LD no estado líquido é um processo desenvolvido pela Thyssen (Thyssen Krupp Stahl AG) e FehS (Forschungsgemeinschaft Eisenhuettenschlacken), na Alemanha, essa técnica envolve a adição de areia (Quartzo) à escória de aciaria LD, respeitando características específicas, seguido da insuflação de oxigênio, conforme ilustrado na Figura 16. O que provoca uma oxidação exotérmica do ferro metálico e do ferro divalente, liberando energia. A energia liberada será o suficiente para dissolver a sílica sem perda de temperatura. Com isso a viscosidade da escória decresce significativamente, o que permite dissolver CaO livre, pois altera a cinética da reação. O percentual de expansão final obtido é inferior a 0,5%, de acordo com os ensaios europeus (SILVEIRA, 2004; SOUZA, 2007).

Figura 16 - Processo de inertização da escória no estado líquido.



Fonte: Silveira, 2004.

3.4.5 Metodologia para produção da ACERITA

O processo de cura acelerada por umectação e aeração da escória de aciaria LD foi desenvolvido pela CST em conjunto com a Kaeme Empreendimentos e Consultoria. Essa técnica consiste em umectar a escória com água, seguida de uma aeração controlada para acelerar a reação de hidratação dos óxidos presentes na escória. O objetivo é reduzir a expansibilidade da escória e torná-la adequada para utilização em diferentes aplicações em apenas dois meses.

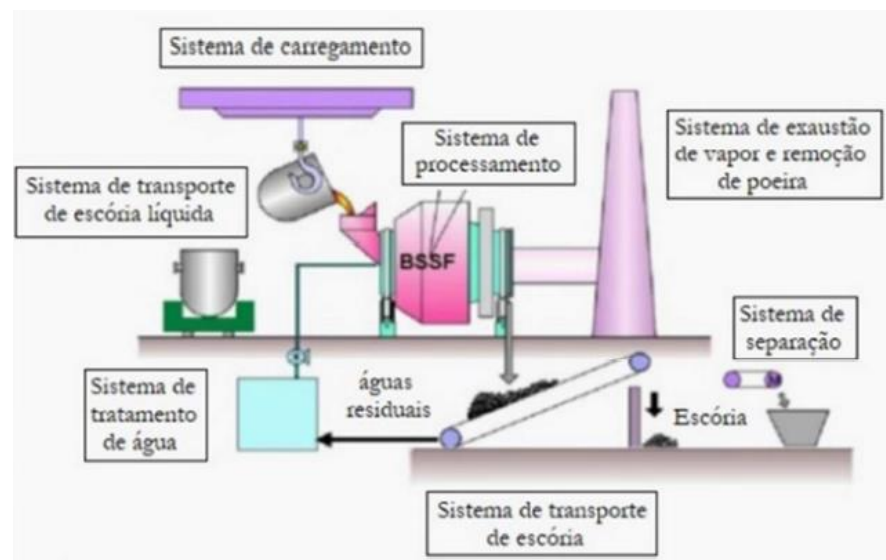
No processo de cura acelerada a quantidade e a periodicidade da umectação e aeração da escória são previamente definidas e controladas para acelerar as reações de hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio livres presentes na escória, fazendo com que a escória seja adequada aos limites de expansão volumétrica definida pelas normas de pavimentação. Quando a escória é tratada de acordo com esse processo, é denominada "Acerita" (SILVEIRA, 2004).

3.4.6 BSSF - Baosteel's Slag Short Flow

A empresa chinesa Baosteel Metal Company desenvolveu um método de beneficiamento da escória de aciaria conhecido como BSSF (*Baosteel's Slag Short Flow*). Esse processo permite o resfriamento e estabilização instantânea da escória, resultando em um produto granulado de qualidade. No método BSSF, a escória líquida, ainda em altas temperaturas, é direcionada para um recipiente rotativo. Por meio da combinação de força mecânica exercida por esferas de aço e resfriamento rápido, a escória é solidificada e triturada em pequenas partículas. Esse processo ocorre em um curto período de tempo, normalmente entre três e cinco minutos, conforme ilustrado na Figura 17 as etapas do processo (BENITTEZ, 2021).

Uma das principais características ao resfriar a escória de aciaria pelo método BSSF é a sua rápida estabilização. Os grãos da escória reagem com o vapor e CO₂, o que resulta na rápida estabilização da cal livre presente na escória. Esse processo reduz significativamente a quantidade de cal livre não reagida, diminuindo a capacidade expansiva da escória. Além disso, o processo BSSF promove a separação eficiente do metal residual da escória. Isso ocorre devido aos diferentes pontos de solidificação do metal e da escória, evitando sua mistura durante o descarregamento (SILVEIRA, 2004; SOUZA, 2016).

Figura 17 - Beneficiamento da escória de aciaria processo BSSF



Fonte: BENITTEZ, 2021.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado na forma de um referencial teórico a partir da pesquisa bibliográfica e posterior análise. E com base na metodologia e variações divulgadas nas diversas fontes consultadas, foi realizada uma análise da viabilidade do uso da escória de aciaria e suas aplicações atuais e potenciais.

Para os processos de busca, foram utilizados os seguintes portais:

- Scientific Electronic Library Online – SciELO,
- Google Scholar,
- Acervo Técnico ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais,
- Repositorio on-line UFRGS, UFOP,
- Visita à planta de beneficiamento de escória da HASCO na unidade Gerdau Ouro Branco.

5 DISCUSSÃO DA PROBLEMÁTICA

A hidratação dos óxidos presentes na escória pode levar à deterioração do produto em que ela está sendo utilizada. As escórias de aciaria possuem diferentes teores de óxidos, que são suscetíveis à hidratação. É importante destacar que existem diferenças nos teores de óxidos entre as escórias provenientes do refino primário e secundário. Como resultado, as escórias do refino primário tendem a apresentar uma maior expansão e uma menor estabilidade volumétrica, ou seja, podem sofrer uma expansão significativa e ter uma menor capacidade de manter sua estabilidade dimensional. Os processos de tratamento da escória de aciaria têm o propósito de viabilizar sua aplicação em diferentes setores, contribuindo para a maximização dos recursos.

Aproveitar a escória de aciaria como um coproduto, tanto interna quanto externamente à indústria siderúrgica, oferece benefícios significativos tanto ambientais quanto financeiros. Em vez de ser descartada em aterros, a escória é utilizada como um recurso valioso, ajudando a preservar os recursos naturais e reduzir os impactos ambientais associados à extração. Essa prática evita o descarte da escória de aciaria, que é abundante na indústria siderúrgica, e a transforma em um substituto para recursos naturais na fabricação de produtos diversos.

5.1 Indústrias produtoras de cimento

Uma das opções após o tratamento da escória de aciaria é utilizá-la como matéria-prima para o cimento Portland, reduzindo o consumo de material e energia para obtenção de clínquer, e a sua composição pode ser vista na

Tabela 9.

Tabela 9 - Principais características da escória de aciaria em comparação com o clínquer e cimento Portland

| Produto | Características Principais e Composição |
|------------------------------|---|
| Clínquer de Cimento Portland | C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF Elevada atividade Hidráulica |
| Cimento Portland | C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF + Sulfatos Elevada atividade Hidráulica |
| Escória de Aciaria LD | Baixo teor de C_2S Não vítrea Baixa Hidraulicidade |

Fonte: Adaptação: TAYLOR, 1997; Leia 1970 apud RIZZO, 2006.

A escória de aciaria LD estabilizada através do processo de granulação possui um teor de CaO livre inferior ao da escória resfriada lentamente. O MgO se combina com FeO e MnO para formar uma solução sólida, que não está na forma de periclásio que é considerada instável (GUMERI, 2004).

Quando resfriada repentinamente, a escória de alto-forno geralmente se solidifica em uma forma vítrea e apresenta uma estrutura amorfa, que é chamada de escória granular. A composição química afeta a fluidez e a vitrificação. A escória LD é mais difícil de solidificar na forma vítrea devido à sua alta basicidade, em comparação com a baixa basicidade da escória de alto-forno.

A relação entre o estado vítreo e a formação de produtos cimentícios em alguns materiais é complexa, em certos materiais os componentes SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 podem estar na forma cristalina. O grau de vitrificação da escória de alto-forno utilizada para cimento deve ser de pelo menos 67% e alguns autores consideram que este valor pode chegar a 95% (GUMERI, 2004).

A análise mostra que a adição de escória de aciaria ao cimento melhora os resultados obtidos quando a quantidade de adição é de 10%, onde os limites mínimo e máximo considerados são de 6% e 34%, respectivamente. Em comparação com características do cimento, a escória de aciaria com resfriamento lento tem um menor teor de C_3S , portanto, seu desempenho no cimento é limitado; porque o silicato não é hidratável e há wustita (forma mineral de óxido de ferro (II)) como a fase principal (GUMERI, 2004).

O C_3S e C_2S_{beta} são os silicatos comuns no clínquer. As formas impuras de C_3S e C_2S_{beta} são chamadas de alita e belita, respectivamente. A belita em cimento tem uma estrutura irregular e é menos reativa que o alita. O C_2S encontrado no clínquer pode ser proveniente de duas fontes: C_2S formado pela clinquerização dos óxidos de cálcio e silício, denominados C_2S primário, e C_2S da decomposição do C_3S , denominado secundário (GUMERI, 2004).

A capacidade de endurecer na presença de água (hidraulicidade) da escória aumenta à medida que a relação CaO/SiO_2 atinge o valor limite, pois o aumento do CaO aumenta o CaO não dissolvido, aumenta a viscosidade e dificulta a granulação. O desempenho aumenta com a finura da escória (GUMERI, 2004).

Segundo Gumeri (2004), ensaios realizados demonstraram que as escórias de aciaria resfriadas bruscamente têm menor expansibilidade e desenvolvem propriedades cimentícias favoráveis. Quando utilizadas como adição em cimentos, essas escórias apresentam resistência mecânica compatível com as referências do Cimento Portland. Isso indica que a incorporação da escória de aciaria como adição cimentícia pode contribuir para melhorar as características do cimento, como resistência e durabilidade, proporcionando um desempenho adequado em aplicações construtivas.

O estudo conduzido por ARRIVABENE (2012) explorou o aproveitamento da escória de aciaria LD e do pó de serragem de granito como adições ao clínquer na produção de cimento. A partir dos resultados obtidos e das condições utilizadas, foram obtidas diversas conclusões significativas. Uma das constatações foi que as misturas dos resíduos resfriadas em água apresentaram uma estrutura amorfa, enquanto as misturas resfriadas lentamente no forno formaram os compostos Akermanita e Gehlenita. A presença desses compostos, resultante do resfriamento lento, comprovou a viabilidade da utilização das misturas na indústria cimenteira,

uma vez que possuem as fases mineralógicas ideais para a atividade hidráulica das escórias. No entanto, observou-se que a presença de partículas de aço na escória teve um impacto negativo na área específica do cimento produzido, resultando em uma redução da resistência à compressão. Por outro lado, ARRIVABENE (2012) notou que quando a superfície específica do cimento atingiu os valores estabelecidos pelas normas, a resistência à compressão também atingiu os padrões exigidos. Foi destacado que a área específica é um fator crucial que influencia significativamente a resistência à compressão do cimento. Assim, a adição do resíduo de granito mostrou-se eficiente na redução da expansibilidade da escória de aciaria. Isso indica que o ajuste da composição química da escória por meio da adição do resíduo de granito é uma abordagem tecnicamente viável ao incorporar o clínquer de cimento Portland.

No trabalho realizado por ZAGO (2019), foram examinadas as propriedades da escória de aciaria LD como agregado de concreto, bem como o impacto dessa substituição na areia natural em concretos de cimento Portland em diferentes proporções (0%, 25%, 50% e 75% em massa). Os resultados revelaram que os agregados de escória apresentaram maior porosidade, absorção de água e menor resistência ao desgaste superficial em comparação aos agregados naturais. Os concretos produzidos com e sem agregados de escória alcançaram resistência satisfatória à tração e compressão. No entanto ZAGO (2019) observou uma diminuição no módulo de elasticidade devido à baixa rigidez da escória, assim como uma redução na trabalhabilidade dos concretos. Assim, os agregados de escória demonstraram desempenho satisfatório, e em alguns casos até superior, nas propriedades do concreto. A análise da reação álcali-agregado revelou que as argamassas contendo escória apresentaram expansão além dos limites estabelecidos pelas normas, mesmo após a mitigação da reação. Isso indica que componentes da escória estão contribuindo para essas expansões indesejadas.

5.2 Pavimentação e construção civil

BARBOSA (2013) realizou ensaios padrões para caracterizar amostras de escória de aciaria, visando sua utilização em pavimentação, especialmente em base e sub-base. Foram analisadas amostras de diferentes tipos de aciaria e aço

produzidos em diferentes regiões do Brasil. Os ensaios realizados por difração de raios-X revelou que as escórias de aciaria brasileiras possuem composição química semelhante, com pequenas diferenças entre as escórias curadas e não curadas. Ao avaliar as amostras no microscópio eletrônico de varredura (MEV), foram observadas dimensões diversas e angulosas nas partículas de escória. Foi identificado que os problemas relacionados à expansibilidade da escória de aciaria precisam ser solucionados antes de sua aplicação. Os resultados do estudo indicaram que a maioria das escórias analisadas atendia aos requisitos básicos para aplicação em pavimentações, exceto uma amostra que apresentava alta expansibilidade. Concluiu-se, portanto, que o tratamento da escória é necessário quando ela não possui as características adequadas para aplicação direta em pavimentações.

COSTA (2019) realizou análises de Massa Específica, Massa Unitária e Índice de Vazios nas escórias de alto-forno e de aciaria elétrica. Os resultados mostraram que as escórias de alto-forno apresentaram valores maiores em relação às escórias de aciaria elétrica. Essa diferença pode ser atribuída às variações nos processos produtivos e na composição química das escórias. As escórias provenientes de alto forno exibiram uma predominância de fases amorfas, que mascaram as fases cristalinas minoritárias, tais como SiO_2 , $\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{Si}_2\text{O}_7)$, $(\text{Ca}_{0,742}\text{Fe}_{0,087})$, $(\text{Mg}_{0,016}\text{Al}_{0,888}\text{Fe}_{0,075})$, $(\text{Al}_{0,5}\text{Si}_{1,5})\text{O}_6$. Por outro lado, a escória proveniente da aciaria revelou a presença de fases como FeO , Fe_3O_4 , Ca_2SiO_4 e $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$. Os grãos das escórias indicaram que podem ser utilizados em diversas aplicações como agregados na construção civil. No entanto, a composição química das escórias sugere que são necessários aditivos adicionais para torná-las viáveis em aplicações mais restritas. Isso poderia resultar em um aumento de custos para sua utilização nessas aplicações específicas.

Os ensaios granulométricos realizados nas escórias de alto-forno e de aciaria demonstraram que elas são viáveis como agregados miúdos e graúdos na construção civil. Os resultados dos ensaios estão em conformidade com as normas vigentes para esse tipo de aplicação. Isso indica que as escórias podem ser utilizadas de acordo com as especificações estabelecidas para uso como agregados na construção civil.

De acordo com o estudo realizado por Geyer (2001), os ensaios de viabilização da escória de aciaria elétrica demonstraram que é adequada para adições de até 35% no concreto. Adições de até 5% resultaram em melhorias na resistência e redução da profundidade de carbonatação em comparação com o concreto convencional. Além disso, a adição de escória ao concreto armado não afetou seu desempenho, mesmo em condições corrosivas, onde foram utilizados cloretos como agente corrosivo.

O estudo de Freitas (2018) investigou a possibilidade de reutilização da escória de aciaria na fabricação de tijolos maciços, substituindo os agregados naturais e os ligantes convencionais. Os resultados obtidos indicaram que essa abordagem é viável. No que diz respeito à caracterização da escória de aciaria em relação ao tempo de estocagem em pátio aberto, foi observado que as escórias com um tempo de cura superior a um ano apresentaram uma maior superfície específica, cujo valor se enquadrou na faixa especificada para o cimento. Independentemente da idade, as escórias foram classificadas como agregados miúdos.

Ao avaliar o consumo de escória de aciaria na construção civil, o estudo de Freitas (2018) mostrou que a aplicação proposta no Estado de Minas Gerais tem a capacidade de utilizar 84% do volume de escória gerado no Brasil. Para simular o consumo de escória na produção de tijolos para alvenaria estrutural, considerou-se o uso do tijolo T2 (85-Escória LD/15-Rejeito de Minério/0-Cimento), que contém 2,07 kg de escória de aciaria. A construção de uma casa popular utilizando 10.000 tijolos foi considerada como base para esse cálculo.

De acordo com a avaliação técnica de PEDROSA (2010), a utilização de escória de aciaria em misturas asfálticas do tipo Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é perfeitamente viável, desde que a escória de aciaria seja devidamente curada. Os resultados encontrados indicaram que é possível realizar dosagens de misturas asfálticas com escória de aciaria que estejam dentro dos limites normativos estabelecidos. Além disso, essas misturas apresentaram desempenho semelhante, em termos de resistência mecânica, vida útil em fadiga e deformação permanente, às misturas asfálticas convencionais feitas com agregados naturais. Os resultados do estudo demonstram que é viável utilizar escória de aciaria em misturas asfálticas, obtendo resultados comparáveis às misturas convencionais, desde que sejam tomados os devidos cuidados de classificação e cura da escória.

Após realizar estudos e ensaios laboratoriais de caracterização física, mecânica, química, ambiental e de expansibilidade em diversas escórias de aciaria, BARBOSA (2013) concluiu que a maioria das amostras atende aos requisitos mínimos para aplicação em pavimentações. No entanto, uma das amostras exigiria controle de expansibilidade. De forma geral, os resultados indicaram um enorme potencial de aplicação das escórias de aciaria na construção de base e sub-base de obras de pavimentação, apesar das diferenças nos processos de produção, tipos de aço e locais das unidades, sendo essencial garantir que as condições físicas, mecânicas, químicas, ambientais e de expansibilidade sejam atendidas para garantir a segurança na execução das obras. E para um melhor aproveitamento da escória de aciaria BARBOSA (2013) enfatiza que as escórias de aciaria LD devem ser resfriadas, processadas e curadas separadamente das escórias do Forno Panela para evitar possíveis contaminações e aumentar o tempo de cura desses materiais.

5.3 Agricultura

Dado o alto teor de CaO e P_2O_5 , a escória de aciaria também pode ser usada como fertilizante ou aditivo no cultivo de plantas ou algas. Entretanto, a presença de álcalis e chumbo (Pb) limita seu uso devido às preocupações com a toxicidade (RIZZO, 2006).

As escórias de aciaria que possuem teores elevados de P_2O_5 possuem propriedades que as tornam adequadas para serem utilizadas como fertilizantes à base de fosfatos. No entanto, essas escórias com altos teores de P_2O_5 são mais comumente encontradas em conversores Thomas, que têm sido menos utilizados devido à preferência por matérias-primas com menor teor de P_2O_5 e aos avanços nos processos de refino do aço (GUMERI, 2002).

As escórias de aciaria contêm elementos fertilizantes como CaO , SiO_2 , MgO , FeO , MnO e P_2O_5 , que são amplamente utilizados na agricultura. Essas propriedades das escórias podem ser aproveitadas para corrigir a acidez do solo. Em países desenvolvidos como Alemanha, Estados Unidos, França e Japão, as escórias de aciaria são utilizadas como matéria-prima para a produção de fertilizantes silicosos, fosforosos e micronutrientes. Essa utilização das escórias

contribui para a sustentabilidade agrícola e a utilização eficiente de subprodutos industriais (ZHINONG, 2005; YI, 2012).

De acordo com a pesquisa realizada por Barbosa (2013), a escória de aciaria também pode ser utilizada como corretivo de acidez do solo. Isso se deve à sua natureza básica e à presença de micronutrientes. Essa prática tem se mostrado eficaz na melhoria da qualidade do solo e no fornecimento de nutrientes essenciais para as plantações. Estudos com escórias têm mostrado que elas podem aumentar o pH do solo e reduzir a presença de H^+Al devido à presença de agentes neutralizantes de acidez, como o $CaSiO_3$ presente na escória. Além disso, a aplicação de escórias tem demonstrado aumentos na disponibilidade de nutrientes como fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si) no solo. Esse aumento de nutrientes tem sido benéfico para culturas como arroz e cana-de-açúcar, que são acumuladoras de Si (BARBOSA, 2013; PRADO, 2003).

De acordo com (ZHINONG, 2005), a aplicação da escória de aciaria traz diversos benefícios para o tratamento do solo e promove a reutilização desse coproduto, visando a redução da área de armazenamento e a poluição ambiental. No entanto, é fundamental realizar o tratamento dos elementos nocivos presentes na escória e garantir que os fertilizantes atendam aos padrões agrícolas estabelecidos. A escória de aciaria tem efeitos distintos no solo em relação à correção do pH, ao fornecimento de cálcio, magnésio, ferro e manganês. É importante levar em consideração as condições específicas de cada solo e determinar a quantidade adequada a ser aplicada. Essa abordagem personalizada é essencial para garantir uma utilização eficiente da escória de aciaria como fertilizante.

Acrescentando, a Associação Europeia de Organizações e Empresas Preocupadas com todos os Aspectos da Fabricação e Utilização de Produtos de Escória (Euroslag) relata que a cal proveniente das escórias de conversor BOF, bem como a escória de panela resultante da produção de aço, possui um alto poder neutralizante, o que resulta em efeitos imediatos e sustentáveis no pH do solo. Além disso, o teor de silicato solúvel e a reatividade desses materiais aumentam a mobilidade do fosfato no solo, melhorando a eficiência da fertilização fosfatada. Em suma, os materiais de calagem de silicato presentes nas escórias têm propriedades benéficas para a nutrição das plantas e a qualidade do solo. Eles melhoram o pH do

solo, fornecem nutrientes essenciais, estabilizam os agregados do solo e aumentam a disponibilidade de fosfato.

5.4 Lastro ferroviário

A fim de estabelecer uma ferrovia devidamente estruturada, é essencial considerar a importância do lastro. O lastro consiste em um material pétreo que deve atender a determinadas especificações, sua função é distribuir e amortecer as cargas sobre uma plataforma, proporcionando estabilidade e durabilidade à via. Além disso, o lastro deve manter firmemente posicionados os dormentes, permitir a ventilação e a permeabilidade adequadas, evitando a formação de bolsas de lama. É desejável que o lastro seja facilmente restaurado e mantido durante a manutenção da via (BARBOSA, 2013).

A NBR 5564 (2021) especifica o uso de materiais em lastro, como: granito, basalto, calcário calcítico e dolomítico, além de outras litologias. Ao selecionar o lastro ferroviário, é fundamental considerar fatores cruciais, como a resistência ao desgaste e à abrasão. O material escolhido deve ser capaz de suportar o desgaste contínuo causado pela interação dos trilhos e dos dormentes, garantindo uma vida útil prolongada para a via. Além disso, é importante que o lastro apresente baixa cimentação, evitando a presença excessiva de fragmentação. Evitando assim a compactação do lastro, que comprometeria a drenagem adequada e a flexibilidade da via (BARBOSA, 2013).

No estudo realizado por GOMES (2022), o objetivo foi caracterizar a escória de aciaria para sua aplicação como lastro ferroviário, seguindo as normas brasileira e americana. O foco do estudo foi avaliar a influência da umidade na resistência ao choque e na perda de massa por abrasão desse agregado siderúrgico, especificamente a escória de aciaria. Com base nos ensaios realizados, análise das normas, referências e valores estatísticos gerados, foi concluído que o agregado siderúrgico atendeu aos limites estabelecidos pela norma internacional (AREMA), exceto em relação à absorção e porosidade e não houve sensibilidade significativa nos testes de resistência ao impacto e abrasão quando a escória foi submetida à saturação.

No entanto GOMES (2022) traz que são necessários ensaios adicionais para investigar o comportamento mecânico do agregado siderúrgico quando saturado, como ensaios triaxiais de carga repetida, teste de caixa e, especialmente, em vias instrumentadas. Isso é importante para selecionar corretamente o agregado,

levando em consideração tanto os aspectos mecânicos quanto hidráulicos, e estabelecer parâmetros normativos mais adequados ao potencial de desempenho dos agregados siderúrgicos. Por fim, os ensaios realizados e a análise estatística permitiram concluir que a escória não apresentou sensibilidade à saturação das partículas em relação à produção de finos nos testes de impacto e abrasão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta análise de estudo bibliográfico do uso da escória de aciaria foi possível especificar as técnicas mais usuais para identificação da CaO, MgO e demais óxidos presentes na escória de aciaria, para posteriormente servir como referência para escórias de diferentes composições, identificando quais procedimentos podem ser utilizados durante a sua caracterização e após sua aplicação.

Como pôde ser visto a composição química das escórias é geralmente expressa em termos de óxidos simples. Para isso, técnicas como difração de raios X (DRX) são utilizadas para identificar as fases cristalinas presentes. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é empregada para analisar a morfologia e a superfície da escória, enquanto a espectrometria de dispersão de energia é usada para a análise da composição química dos elementos presentes. Essas técnicas permitem determinar a composição química para entendermos quais caminhos podemos seguir para promover a estabilidade da escória em relação à hidratação ou oxidação.

Vários processos estão sendo desenvolvidos para tratar a escória de aciaria visando sua aplicação. Destaca-se a cura no estado líquido, com aditivos, e a cura por envelhecimento, amplamente utilizada. Outra abordagem é a cura com vapor de água (sob pressão ou não), que reduz o tempo de cura para algumas horas. A escolha do processo de cura para a escória dependerá da disponibilidade de recursos na indústria siderúrgica.

Após a escória de aciaria ser curada ela poderá ser aplicada em diferentes setores, como a indústria cimenteira, pavimentação, construção civil, agricultura e ferrovias. Pode ser usada como substituta ao calcário na produção de clínquer ou na produção de cimento, como base para pavimentações, agregado para concreto, correção da acidez do solo, fertilizante e como lastro ferroviário. Sua versatilidade e potencial de reutilização são destacados nessas diversas áreas.

Em resumo, utilizar a escória de aciaria como coproduto oferece benefícios ambientais ao evitar o descarte em aterros e ajudar na conservação dos recursos naturais. Ao mesmo tempo em que criar oportunidades de receita por meio de sua utilização em diferentes setores industriais.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Com base neste estudo estas são algumas ideias para trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos dentro do mesmo tema.

O levantamento dos custos relacionados às modificações necessárias para o tratamento das escórias de aciaria nas siderurgias atuais;

Quantificar os desafios para utilização da escória de aciaria na captura de CO₂.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRIVABENE, Lúcio Freitas *at al.* Viabilidade técnica da fabricação de cimento com mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito. **Metalurgia e materiais**, Minas Gerais, jul. 2012. Mercado. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672012000200013>. Acesso em: 18 Nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5564**: Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6474**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

BALTAZAR, Rodrigo Pinheiro. **Caracterização do fator expansão de uma escória de aciaria em diferentes processos de cura para uso em pavimentação** – Minas gerais, 2001. Trabalho de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Visoça, 2001. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/7724/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 01 Mai. 2023.

BARBOSA, Marina Renó. **Caracterização Geoambiental da Escória de aciaria de Cinco Estados Brasileiro** – Minas Gerais, 2013. Trabalho de Pós-graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas - Universidade Federal Ouro Preto, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/3317>. Acesso em: 17 Nov. 2021.

BENITTEZ, Leandro Henrique et al. Bloco de Concreto com Incorporação de Escória de Aciaria BSSF: Um Estudo Para Substituição de Agregados Naturais. **Revista Principia**, vol.59, N.3. Ago.2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5214>. Acesso em: 15 Mai. 2023.

BITTENCOUT, Tiago Seixas *et al.* **Análise Técnica e Operacional do Emprego de Sucata Recuperada no FEA**. ABM (Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração) - Week, Rio de Janeiro, 30 Set, 2016. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/analise-tecnica-e-operacional-do-mprego-de-sucata-recuperada-no-fea>. Acesso em 30/04/2023.

BOLDRINI, Bruna Gotardo; PACHECO, Ronaldo Feu rosa. Estudo do Comportamento da Escória de aciaria Tipo LD em Base de Pavimentos Urbanos. **Revista Ifesciência**, vol.8, p.1-10. Jun.2022. Disponível em: DOI: 10.36524/ric.v8i1.906. Acesso em: 27 Mai. 2023.

BRANCO, Verônica Teixeira Franco Castelo. **Caracterização de Misturas Asfálticas com o uso de Escórias de aciaria como Agregado** – Rio de Janeiro, 2004. Trabalho de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://livros01.livrosgratis.com.br/cp084195.pdf>. Acesso em: 18 Nov. 2021.

COSTA, W.F.S., CHOQUE FERNANDEZ, O. J., SOUSA, M. S. C. **Caracterização de Escória de Aciaria e Alto-forno Produzidas em Usinas ao Longo da Estrada de Ferro Carajás para Aplicação Industrial**. In: XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2019, Belo horizonte.

EUROSLAG.net. **Euroslag on line**: Associação europeia de organizações e empresas preocupadas com todos os aspectos da fabricação e utilização de produtos de escória. Disponível em: <https://www.euroslag.com/>. Acesso em: 13 Jun. 2023.

FREITAS, Suzy Magaly Alves Cabral de. **Escória de aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável** – Minas Gerais, 2018. Trabalho de Pós-graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT - Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.2014.006/pdf/tmm-11-1-41.pdf>. Acesso em: 17 Nov. 2021.

GEYER, Rejane Maria Rubino. **Estudo sobre a Potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto** – Porto Alegre, 2001. Trabalho de Doutorado em Engenharia de Minas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/1508>. Acesso em: 19 Nov. 2021.

GOMES, Maelckson Bruno Barros *at al*. Análise da influência da umidade nos ensaios de perda de massa por abrasão e por impacto em um agregado siderúrgico para utilização em lastro ferroviário. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, 2022. v.8, n.7, p. 51646-51659, jul., 2022. Disponível em: 10.34117/bjdv8n7-196. Acesso em: 18 jun. 2023.

GONÇALVES, Hugo Filipe Parreiras *et al*, Estudo Micro estrutural da escória de convertedor LD e sua Relação com o Processo de Desfosforação. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, vol.2, n. 1, p.41-49. Jan./Mar.2014. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.2014.006/pdf/tmm-11-1-41.pdf>. Acesso em: 17 Nov. 2021.

GRAFFITTI, Daniele Fernandes *et al*, Determinação de Cal livre em Escória de Aciaria Elétrica como Contribuição para Avaliação de sua Expansibilidade. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, vol.2, n. 2, p.24-28. Out.2005. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.00202005/pdf/1573492069-2-2-24.pdf>. Acesso em: 17 Nov. 2021.

GUMERI, Adriana Guerra, **Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos** – Porto Alegre, 2002. Trabalho de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/2652>. Acesso em: 19 Nov. 2021.

GUMERI, Adriana Guerra, Utilização de Escória de Aciaria do Linz-Donawitz como adição em cimentos. **Revista ABM**, vol.1, p.69-74. Jul.2004. Disponível em: <https://www.tecnologiammm.com.br/article/doi/10.4322/tmm.00101014>. Acesso em: 17 Nov. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL, **Coprodutos e resíduos**, Disponível em: <https://acobrasil.org.br/sustentabilidade2016>. Acesso em: 14 Nov. 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL, **Relatório de sustentabilidade**, Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/assets/pdf/PDF-2020-Relatorio-Aco-Brasil-COMPLETO.pdf>. Acesso em: 02 Jan. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL, **Relatório de sustentabilidade**, Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2023/06/AcoBrasil_Minianuario_2023.pdf. Acesso em: 18 Jun. 2023.

JHON, Elisabeth; STEPHAN, Dietmar. Properties of Calcium Silicate Hydrates with varying Stoichiometry. **ICSEFCM**, Szczecin, 2018. 25 Mai., 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/325398031>. Acesso em: 18 jun. 2023.

MASUERO, Angela Borges, MOLIN, Denise Carpena Coutinho Dal, VIELA, Antônio César Faria, **Estabilização e Viabilização técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica** – Porto Alegre – Universidade Federal do rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/31652>. Acesso em: 19 Nov. 2021.

MORAIS, Carlos Filipe de Souza. **Implantação da Ferramenta “Disponibilidade” no Desgasificador à vácuo da CSN** – Fortaleza, 2015. Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <https://www.repositoriobib.ufc.br/000020/00002057.pdf>. Acesso em: 03 Jan. 2022.

MOURÃO, Marcelo Breda *et al.* **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5635026/mod_resource/content/0/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20a%20Siderurgia%20-%20Mour%C3%A3o%2C%20MB.pdf. Acesso em: 07 Dez. 2021.

NORMA BRASILEIRA. **NBR 7217**: Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

NORMA BRASILEIRA. **NBR 9676**: Determinação da Massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1986.

PRADO, R.M. *et al.* efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:287-296, Set.. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200009>. Acesso em: 13 Jul. 2021.

PEDROSA, Rogério Antônio Alves, **Estudo de viabilidade técnica e econômica do uso de Agregados de Escória de Aciaria em Concreto Betuminoso a Quente** – Ouro Preto, 2010. Trabalho de Mestrado em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/2383>. Acesso em: 14 Nov. 2021.

POLESE, Mariana de Oliveira, CARREIRO, Gisele Lopes, SILVA, Maristela Gomes da, SILVA, Moema Ribas. Caracterização da Estrutural da escória de Aciaria. **Revista Matéria**, v. 11, n. 4, pp. 444 – 454, jun, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-70762006000400011>. Acesso em: 18 Nov. 2021.

RAPOSO, Carlos Olympo Lima. **Estudo Experimental de Compactação e Expansão de uma Escória de Aciaria LD para o uso em Pavimentação** – Espírito Santos, Vitória. Trabalho de Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Espírito Santo, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344413318_ESTUDO_EXPERIMENTAL_D_E_COMPACTACAO_E_EXPANSAO_DE_UMA_ESCORIA_DE_ACIARIA_LD_PARA_USO_EM_PAVIMENTACAO. Acesso em: 30 Abr. 2023.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira. **Processos de refino Primário dos aços nos Convertedores a Oxigênio**. São Paulo: ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

ROHDE, Luciana, **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos** – Estudo Laboratorial – Porto Alegre, 2002. Trabalho de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/3878>. Acesso em: 19 Nov. 2021.

SANTOS, ROGÉRIO JOSÉ DOS. **Processo BSSF - Granulação da Escória de Aciarias** – Espírito Santos: Vitória, 2022. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/566805712/0-Apostila-processo-Do-Bssf-granulacao-de-Escoria-Do-Bof-criacao>. Acesso em: 30 Abr. 2023.

SHU, Kaiqian; SASAKI, Keiko. Occurrence of steel converter slag and its high value-added conversion for environmental restoration in China: A review. **Journal of Cleaner Production**, Fukuoka, jul. 2022. Mercado. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133876>. Acesso em: 18 Jul. 2022.

SILVA, Blênio Marcio Cunha *et al.* **Caracterização Tecnológica de Escórias de Aciaria**. ABM (Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração) - Week, Rio de Janeiro, 30 Set, 2016. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/caracterizacao-tecnologica-de-escorias-de-aciaria>. Acesso em: 17 Nov. 2021.

SILVA, Nazareno Santos Silva. **Siderurgia**. Belém do Para: IFPA – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, 2011. Disponível em: http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/siderurgia/161012_siderurgia.pdf. Acesso em: 14 Nov. 2021.

SILVEIRA, Nocy Oliveira da *et al.* Escoria de Aciaria LD com Redução de Expansão. **Revista ABM**, vol.1, nº 1, p.1-5. Jul.2004. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/tmm.00101001>. Acesso em: 13 Dec. 2021.

SLG.net. **NIPPON SLAG ASSOCIATION on line**: NIPPON SLAG ASSOCIATION. Disponível em: <https://www.slg.jp/e/index.htm>. Acesso em: 13 Jun. 2023. SOUZA, Eduardo de Oliveira e. **Escórias de Aciaria e Resíduos de Concreto Refratários em Componentes de Pavimentação** – Belo Horizonte, 2007. Trabalho de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/ENGD-7ABNJZ/1/eduardobezerra320.pdf>. Acesso em: 29 Mar. 2023.

SOUZA, Ticiane Vieira de Paula, **Caracterização de Escória de Conversor a Oxigênio Obtido no Processo BSSF antes e após Tratamento Hidrometalúrgico** – Fortaleza, 2016. Trabalho de Pós-graduação em Engenharia e Ciência de Materiais – Universidade Federal do Ceará, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/22587>. Acesso em: 08 Jan. 2022.

WORLD STEEL ASSOCIATION, **World steel in figures 2022**, Disponível em: [Sustainability-Indicators-2022-report.pdf](https://www.worldsteel.org/en/sustainability-indicators-2022-report.pdf) (worldsteel.org). Acesso em: 18 Jun. 2023.

YI, Huang et al. An overview of utilization of steel. **Sciverse sciencedirect**. vol.16, nº 1, p.791-801.2012?. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1878029612006469?token=080D283B1156FDA931B279C93BB892C4C897D12C3701F7505865CF933001436BFE8481377342DA0990718BAA0B09BB47&originRegion=us-east-1&originCreation=20230501005648>. Acesso em: 01 Mai. 2023.

ZAGO, Sara de Carvalho *at al*, Características e Limitações do uso da Escória de Aciaria LD como Agregado na Produção de Concreto de Cimento Portland. **ABM Week 2019**. 01 a 03 Out. 2019. Disponível em: 10.5151/2594-5327-33632. Acesso em: 18 Jun. 2023.

ZHINONG, Wu; ZONGSHU, Zou; CHENGZHI, Wang. Reaproveitamento da Escória de Aciaria na Produção Agrícola. **Escola de Materiais e Metalurgia, Northeastern University, Shenyang**. Dec.2005. Disponível em: <http://en.cgsjournals.com/article/doi/10.3969/j.issn.1000-6532.2005.06.006>. Acesso em: 01 Mai. 2023.