



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE RECICLAGEM DE
ESCÓRIA DE REFINO SECUNDÁRIO E UTILIZAÇÃO EM FORNO
ELÉTRICO A ARCO**

Michele Carolina dos Santos Guimarães

Ouro Preto, março de 2022

Michele Carolina dos Santos Guimarães

“Estudo da viabilidade técnica de reciclagem de escória de refino secundário e utilização em forno elétrico a arco”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira Metalurgista.

Ouro Preto, março de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963e Guimarães, Michele Carolina dos Santos.
Estudo da viabilidade técnica de reciclagem de escória de refino secundário e reutilização em forno elétrico a arco. [manuscrito] / Michele Carolina dos Santos Guimarães. - 2022.
43 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Johne Jesus Mol Peixoto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Escória (Metalurgia). 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Economia circular. 3. Aço - Metalurgia - Aciaria elétrica. I. Peixoto, Johne Jesus Mol. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALURGICA E DE
MATERIAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Michele Carolina dos Santos Guimarães

Estudo da viabilidade técnica de reciclagem de escória de refino secundário e utilização em forno elétrico a arco

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista

Aprovada em 17 de março de 2022

Membros da banca

DSc. - Johne Jesus Mol Peixoto - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
DSc. - Cláudio Baetha Vieira - (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Robson Leandro Silva - (Villares Metals S.A.)
Eng.º Leonardo Hideki Miura - (Villares Metals S.A.)

Johne Jesus Mol Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/03/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/10/2022, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0408407** e o código CRC **74904909**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013870/2022-50

SEI nº 0408407

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591561 - www.ufop.br

Aos meus amados pais, irmãos e
sobrinha, por todo amor e apoio
recebidos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus. Por me guiar, me guardar, me dar força e me apresentar pessoas incríveis que permitiram a realização desse sonho.

Agradeço aos meus queridos pais, Maria Helena e Mauro. Obrigada por terem se sacrificado para que eu conseguisse concluir a graduação. Vocês são a minha inspiração.

Agradeço aos meus irmãos, Suélen e Charles, por sempre terem me apoiado e cuidado de mim com muito amor.

Agradeço à minha princesa, Anna Clara, que me trouxe doses de ânimo e alegria em muitos momentos.

Agradeço à minha família, tios, avós e primos, em especial Tia Neuza, Tia Cleusa, Jardel e Jessyca, que sempre me acolheram, incentivaram e tornaram a caminhada mais divertida.

Agradeço a todos meus amigos, em especial Eliza, Daniella e Larissa, que estiveram do meu lado em todos os momentos.

Agradeço à Villares Metals por possibilitar a realização do projeto, em especial ao Robson e ao Egberto, pela contribuição técnica e apoio para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao Johnne, pela orientação e paciência durante o período de desenvolvimento do trabalho e pelo ensinamento durante às excelentes aulas ministradas.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas de Ouro Preto, por todos os recursos oferecidos durante o meu período acadêmico, pelos professores qualificados e pelo grande reconhecimento que tens.

Agradeço a todos os professores que conheci, em especial à M^a Aparecida e Claudio Batista, que me incentivaram, foram meus amigos e me ajudaram em muitos momentos.

Agradeço a todos que contribuíram para a elaboração e desenvolvimento deste trabalho, de forma direta e indireta. Sem vocês, não seria possível.

RESUMO

A escória de aciaria é um subproduto gerado no processo de fabricação do aço e tem como composição principal óxidos metálicos e não-metálicos. O processo de refino secundário mais utilizado no Brasil é realizado no forno panela e a escória gerada nesse processo geralmente é básica e redutora. A busca por alternativas tecnológicas sustentáveis tem sido uma premissa de todos os setores produtivos, em especial os setores de mineração, siderurgia e construção civil, objetivando a promoção da economia circular. A reciclagem de resíduos é uma prática que deve ser incorporada como uma alternativa quando não existe chance de minimização dos resíduos gerados nos processos. Nos últimos anos as pesquisas sobre reciclagem externa das escórias voltaram-se principalmente para a incorporação em cimento e concreto, com poucos estudos focados na utilização dentro da própria siderúrgica. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo a avaliação da viabilidade técnica da reciclagem da escória de refino secundário, transformando-a em insumo a ser utilizado em um forno elétrico a arco (FEA) da empresa *Villares Metals*. Foram realizadas caracterizações físicas e químicas da escória de refino secundário e testes em escala industrial utilizando essa escória como parte das adições no forno elétrico. Considerando uma proporção em peso de 1:1 (escória reutilizada:cal) em 4 testes, foram analisados a composição final da escória de refino primário e o efeito sobre o consumo energético. Observou-se que a utilização nesta proporção possibilitou resultados satisfatórios para a reutilização da escória de refino secundário no FEA. Mais testes serão necessários para estabelecer o melhor procedimento operacional e obter mais dados para avaliar o consumo energético de forma satisfatória. Ressalta-se que além da redução no impacto ambiental e promoção de economia circular, a reutilização de escória implica numa diminuição no consumo de cal utilizada no refino primário.

Palavras-chave: Reciclagem de escória. Economia circular. Aciaria elétrica

ABSTRACT

The steel slag is a by-product generated in the steel manufacturing process and its main composition is metallic and non-metallic oxides. The most used secondary refining process in Brazil is carried out in a ladle furnace and the slag generated in this process is usually basic and reducing. The search for sustainable technological alternatives has been a premise of all productive sectors, especially the mining, steel and civil construction sectors, aiming to promote the circular economy. Waste recycling is a practice that should be incorporated as an alternative when there is no chance of minimizing the waste generated in the processes. In recent years, the research on external recycling of slag has focused mainly on the incorporation into cement and concrete, with few studies focused on use within the steel mill itself. In this sense, this work aims to evaluate the technical feasibility of recycling secondary refining slag, turning it into a co-product to be used in an electric arc furnace (EAF) of the company Villares Metals. Physical and chemical characterizations of the ladle furnace slag and industrial scale tests were carried out using this slag as part of the additions in the electric furnace. Considering a weight ratio of 1:1 (recycled slag:lime) in 4 tests, the final composition of the FEA slag, the effect on energy consumption and on refractory wear were visually analyzed. It was observed that the use in this proportion allowed satisfactory results for the reuse of secondary refining slag in the EAF. However, more tests will be needed to establish the best operating procedure and obtain more data to satisfactorily evaluate energy consumption. It should be noted that in addition to reducing environmental impact and promoting a circular economy, the reuse of slag implies a decrease in the consumption of lime used in primary refining.

Key-words: Slag recycling. Circular economy. Electric steel plant

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Percentual dos tipos de resíduos gerados pela indústria siderúrgica brasileira no ano de 2013.....	12
Figura 1.2: Destinação e aplicação das escórias de alto-forno produzidas no Brasil no ano de 2013	13
Figura 1.3: Destinação das escórias de aciaria produzidas no Brasil no ano de 2013 ...	13
Figura 1.4: Aplicações das escórias da aciaria vendidas no Brasil no ano de 2013.....	14
Figura 3.1: Esquema simplificado de um forno elétrico a arco de corrente alternada ...	18
Figura 3.2: Diagrama de fases dos óxidos constituintes das escórias produzidas na aciaria elétrica .	19
Figura 3.3: Variação do teor de P em escória $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ em função da pressão parcial de oxigênio.	21
Figura 3.4: Influência da fração molar de CaO e da temperatura sobre a capacidade sulfídica de escórias $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, a 1500°C	22
Figura 3.5: Teor de S em escórias. Pontos abertos: escórias CaO-FeO 1873K, $\text{PSO}_2=6\text{-}8\%$. Pontos pretos: CaO-FeO-SiO_2 1773K $\text{PSO}_2=2\%$	23
Figura 3.6: Mecanismo de desagregação da escória por meio de hidratação. Em (a) água em contato com CaO livre presente na escória. Em (b) volume inicial e final dos componentes e (c) volume ocupado pelo produto de hidratação na rede cristalina da escória.....	27
Figura 3.7: Manifestações patológicas decorrentes do uso de escórias de aciaria como material de adição na construção civil.....	27
Figura 3.8: Temperaturas de transformações polimórficas do C_2S – sob pressão atmosférica.....	28
Figura 4.1: Bag de escória e escória coletada.....	33

Figura 5.1: Comparativo do consumo energético usual com o consumo real das corridas testes	37
Figura 5.2: Comparativo da adição usual de cal com a adição de cal utilizada nas corridas testes	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Composição química típica de escórias de FEA e FP	24
Tabela 3.2: Correlações empíricas de basicidade de escórias utilizadas na pratica industrial	24
Tabela 3.3: Composição química característica da escória do forno panela (% em peso).....	28
Tabela 3.4: Comparação da composição química de diferentes tipos de escórias de refino secundário no forno elétrico a arco.....	29
Tabela 3.5: Resultados de análise química das amostras das escórias geradas.....	30
Tabela 3.6: Análise dos compostos encontrados na escória via sonda EBSD.	31
Tabela 3.7: Análise dos compostos encontrados na escória do modelo metalúrgico.....	31
Tabela 5.1: Composição química após caracterização das escorias	35
Tabela 5.2: Composição química das escórias reutilizadas e geradas no refino primário	36

LISTA DE SÍMBOLOS/SIGLAS

AC	<i>Alternating current</i> (Corrente Alternada)
BOF	<i>Basic Oxygen Furnace</i>
DC	<i>Direct current</i> (Corrente contínua)
FEA	Forno elétrico a arco
FP	Forno panela
RP	Refino primário
RS	Refino secundário
LD	<i>Linz Donawitz</i>
DRI	Direct Reduced iron
HBI	Hot Briquetted iron

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Aciaria Elétrica	16
3.2	Forno Elétrico a Arco (FEA)	17
3.3	Escória de Aciaria Elétrica	19
3.4	Reutilização da Escória de Aciaria Elétrica.....	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	Obtenção da Escória de Refino Secundário.....	33
4.2	Caracterização da Escória.....	34
4.3	Testes de Reutilização da Escória de Refino Secundário no FEA.....	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Composição Química da Escória de Refino Secundário	35
5.2	Características da Escória Gerada no Refino Primário.....	36
5.3	Consumo Energético e de Cal.....	37
6	CONCLUSÕES	39
	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	40

1 INTRODUÇÃO

A economia circular é um conceito que tem sido difundido e gerado pesquisas e debates em empresas e universidades. A ideia da economia circular se baseia na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e busca conectar o desenvolvimento econômico à uma melhor utilização dos recursos, substituindo o conceito da economia linear, por meio da recolocação dos resíduos no ciclo produtivo, minimizando a disposição no ambiente e a extração de matéria-prima (FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016).

A minimização da extração de recursos, o desenvolvimento de processos mais eficientes, bem como a maximização da reutilização são as principais características da economia circular. Os coprodutos gerados nas indústrias devem ser desenvolvidos considerando um reaproveitamento que os mantenha no ciclo produtivo, para que possam ser utilizados na própria indústria geradora ou em outras (VAN BELLEN, 2003).

O processo produtivo da indústria siderúrgica gera diversos resíduos com potencial para aproveitamento, como pó de aciaria, carepas, areia de varrição, refratários e escórias, sejam de alto-forno ou aciaria. De acordo com o Relatório de Sustentabilidade do Instituto Aço Brasil, para cada tonelada de aço produzido é gerado cerca de 590kg de resíduos, que totalizaram em 2013, 17,7 milhões de toneladas. Nota-se, nos gráficos da Figura 1.1, que a escória de alto-forno e aciaria representaram 37% e 29% dos resíduos gerados, respectivamente. Deste total, 88% foram reaproveitados (INSTITUTO AÇO BRASIL,



Figura 1.1: Percentual dos tipos de resíduos gerados pela indústria siderúrgica brasileira no ano de 2013 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

Ainda de acordo com o estudo, observa-se que praticamente toda escória de alto-forno foi vendida e destinada especialmente para a produção de cimento, conforme pode-se observar no gráfico da Figura 1.2 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

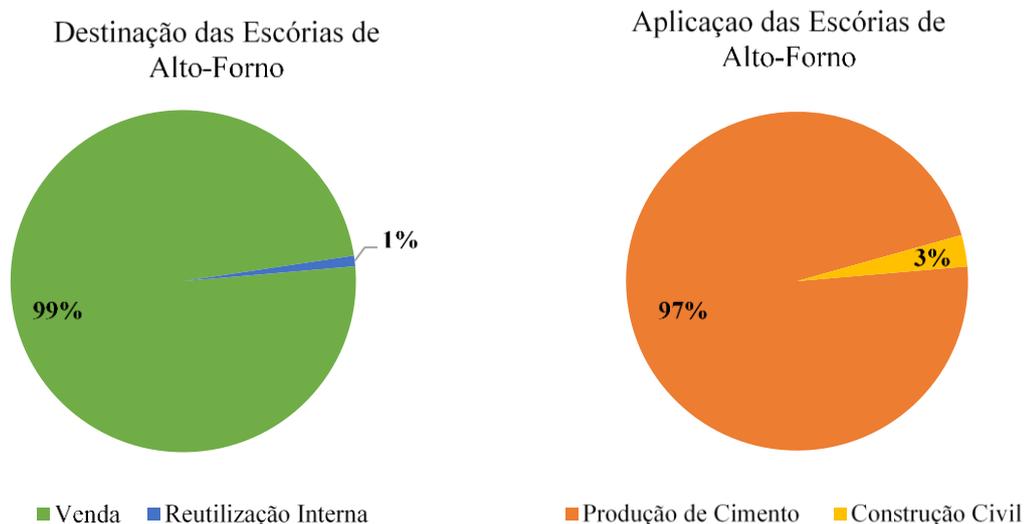


Figura 1.2: Destinação e aplicação das escórias de alto-forno produzidas no Brasil no ano de 2013 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

Em relação às escórias de aciaria, 52% foram vendidas e 26% utilizadas internamente, conforme gráfico da Figura 1.3 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

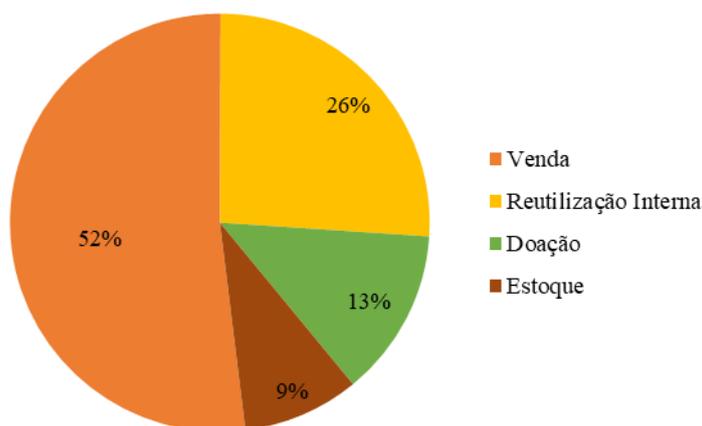


Figura 1.3: Destinação das escórias de aciaria produzidas no Brasil no ano de 2013 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

No que se refere às aplicações das escórias de aciaria, o gráfico da Figura 1.4 indica que este resíduo foi destinado, principalmente, para construção de bases de estradas,

correspondendo a cerca de 62% do volume de escórias vendidas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

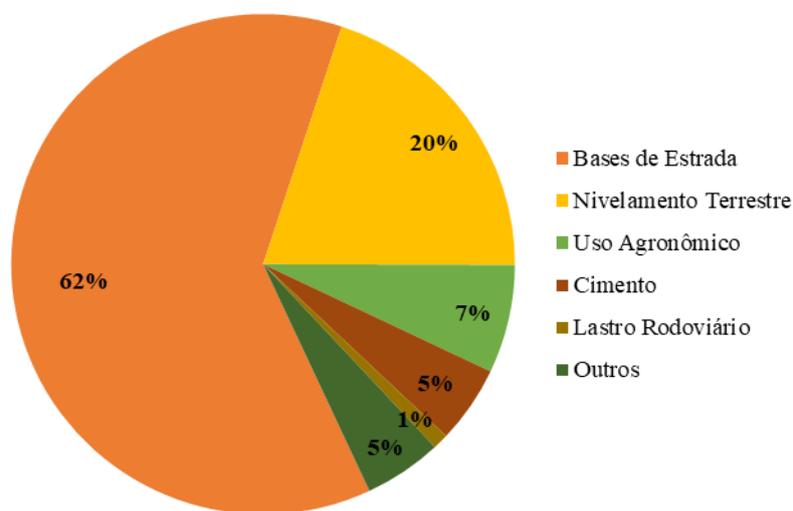


Figura 1.4: Aplicações das escórias da aciaria vendidas no Brasil no ano de 2013 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

Diante dos dados apresentados, é possível notar que a reciclagem dos resíduos gerados pela indústria siderúrgica torna-se interessante tanto do ponto de vista econômico, considerando o aumento dos custos variáveis de mão de obra e produção que, muitas vezes, reduz o lucro final, quanto do ponto de vista ambiental pois permite diminuir o volume dos resíduos que estariam dispostos em aterros, minimizando o impacto ambiental e os custos de operação (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

Este trabalho é destinado à avaliação da viabilidade técnica da reciclagem da escória de refino secundário em um forno elétrico a arco. Os estudos foram baseados em testes realizados na aciaria convencional da *Villares Metals*, uma siderúrgica semi-integrada que atua no segmento de aços e ligas especiais. Com capacidade instalada de 150 mil toneladas anuais de aço bruto e 100 mil toneladas anuais de produtos acabados. A empresa faz parte da divisão *High Performance Metals* do Grupo *voestalpine* e está localizada na cidade de Sumaré, no estado de São Paulo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica de reciclagem da escória de refino secundário em um forno elétrico a arco da empresa *Villares Metals*, por meio de estudos bibliográficos de trabalhos similares, caracterização da escória de refino secundário gerada no processo produtivo e posterior utilização no refino primário, como parte da carga de escorificantes.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca dos conceitos de subprodutos gerados na indústria siderúrgica e suas aplicações;
- Realizar análise de composição química e de umidade da escória de refino secundário gerada no processo produtivo da *Villares Metals*;
- Avaliar o consumo energético, consumo de cal e o *pick-up* de fósforo, através da análise química da escória de refino primário gerada após a utilização da escória de refino secundário como parte da carga de escorificantes.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aciaria Elétrica

As usinas siderúrgicas podem ser divididas em dois grupos: integradas e semi integradas. Usinas integradas são aquelas onde as atividades de transformação do minério de ferro e de produção do aço são realizadas na mesma unidade e, por esse motivo, contemplam as operações de redução, refino e laminação. As usinas semi-integradas, que também são identificadas como *mini-mills*, possuem uma rota de processo mais curta contemplando operações de refino (geralmente aciaria a forno elétrico a arco), lingotamento contínuo ou convencional e laminação. Nas usinas integradas, o aço é obtido partindo do ferro primário, onde a matéria-prima é o minério de ferro, que é transformado em ferro-gusa nos altos-fornos. O ferro-gusa é a matéria-prima utilizada nos convertedores a oxigênio sendo os processos conhecidos como LD (*Linz Donawitz*) ou BOF (*Basic Oxygen Furnace*). Nas usinas semi-integradas o aço é obtido a partir do ferro secundário, onde a matéria-prima é a sucata de aço. Essa sucata é transformada em aço através de fornos elétricos de fusão nas aciarias elétricas (MOURÃO *et al.*, 2007; ANDRADE; CUNHA; GANDRA, 2000).

O forno elétrico a arco (FEA) teve origem em 1878 quando Wilhelm von Siemens fundiu aço em um cadinho, por meio do calor gerado por um arco voltaico, transformando energia elétrica em energia térmica. Nos anos 40, iniciou-se a produção de aço por meio de aciaria elétrica em maior escala. Devido ao maior teor de resíduos na sucata, ao tempo elevado para a fabricação do aço entre dois vazamentos de corrida (*tap to tap*) e à menor capacidade de produção, a rota via forno elétrico a arco (FEA) era empregada, inicialmente, para a fabricação de produtos longos. Porém, em um curto período de tempo, houve um avanço tecnológico que possibilitou a inserção do FEA no processo produtivo de produtos planos, na década de 90, tornando-o uma unidade de fusão de grande escala, rápida e econômica. Além disso, a possibilidade da substituição da carga de sucata por ferro esponja ou ferro de redução direta, como DRI (*direct reduced iron*) e HBI (*hot briquetted iron*), tornou viável a utilização do processo FEA para produção de produtos planos com elevada qualidade, fazendo deste processo um forte concorrente para a produção de aço via convertedores a oxigênio (RIZZO, 2006a).

A fabricação do aço por meio de processos que possuem a eletricidade como principal fonte de energia apresenta algumas vantagens como a necessidade de um menor investimento inicial, melhor eficiência térmica, maior flexibilidade no uso das matérias-primas e na utilização da energia, seja ela química ou elétrica, maior facilidade de automação e melhor homogeneidade de composição e temperatura (MOURÃO *et al.*, 2007).

3.2 Forno Elétrico a Arco (FEA)

Atualmente inúmeros fornos que utilizam a eletricidade como fonte de energia para o aquecimento e fusão de metais têm sido desenvolvidos. No entanto, os mais comuns são o de indução (amplamente utilizado em fundições) e o forno elétrico a arco, sendo o segundo responsável por praticamente 100% da produção de aço em aciarias elétricas (SILVA; MEI, 2006).

O forno elétrico a arco, comumente conhecido como FEA, é um reator metalúrgico utilizado para transformar sucata em aço de elevada qualidade. É considerado um reator versátil pois permite a utilização de 100% de carga sólida, seja ela na forma de sucatas, ferro esponja ou ferro gusa. Ademais, é considerado flexível em relação à sua fácil adaptação a oscilações na produção, pois permite que sua operação seja descontinuada, sendo possível produzir dezenas ou centenas de toneladas. Possui elevada eficiência energética e permite a produção de qualquer tipo de aço devido a capacidade de controlar o aquecimento virtualmente, sem depender apenas do calor fornecido pelas reações químicas como é no caso dos convertedores LD/BOF (SILVA; MEI, 2006).

A conversão da energia elétrica em calor necessário para o processo no FEA ocorre através da transferência de calor por radiação por meio de um arco elétrico gerado pela passagem da corrente em um gás ionizado. O aquecimento é promovido da superfície do material para dentro. Os fornos elétricos a arco podem ser classificados em dois tipos: forno a arco direto e forno a arco indireto. No segundo caso, são utilizados 2 ou 3 eletrodos para que se forme o arco elétrico entre os mesmos. A transferência de calor se dá por radiação, sem que o eletrodo encoste na carga. Esta modalidade é empregada apenas em fornos de baixa capacidade (cerca de 0,25t a 2t) devido à limitação exigida pela posição horizontal dos eletrodos e ao fato de possuir um consumo energético elevado. Já nos fornos a arco direto, a transferência de calor ocorre diretamente para a

carga. O arco elétrico é estabelecido pela passagem da corrente elétrica entre dois pontos. Um desses pontos é o eletrodo de grafite e o outro é a carga, que necessita ter boa condutividade elétrica. O arco elétrico gerado salta entre esses dois pontos. Um aquecimento extra é gerado devido a resistência à passagem da corrente que a carga possui (RIZZO, 2006a).

Os fornos a arco direto podem se dividir entre dois tipos: de corrente contínua (*DC – direct current*) e corrente alternada (*AC - alternating current*). No primeiro caso, a corrente elétrica passa de um eletrodo para a carga e da carga para outro eletrodo instalado na soleira do forno. Nestes fornos, é usual que se utilize apenas um eletrodo na abóbada e um na soleira. Nos fornos de corrente alternada, a corrente elétrica passa de um eletrodo para a carga, por meio do arco elétrico gerado e retorna da carga para outro eletrodo. A polaridade destes dois pontos é invertida a cada semiciclo da corrente com a frequência da rede (no Brasil: 60 ciclos/segundo). São empregados 3 eletrodos neste tipo de forno, que são instalados na abóbada do forno. No Brasil, é predominante o uso de fornos elétricos de corrente alternada. Os fornos de corrente contínua são utilizados em cerca de 45% dos processos que envolvem FEA na siderurgia e a Figura 3.1 ilustra, de maneira simplificada, um forno elétrico a arco de corrente alternada, com a carcaça cortada no sentido do diâmetro, impossibilitando a visualização do terceiro eletrodo por esse motivo (RIZZO, 2006a; SILVA; MEI, 2006).

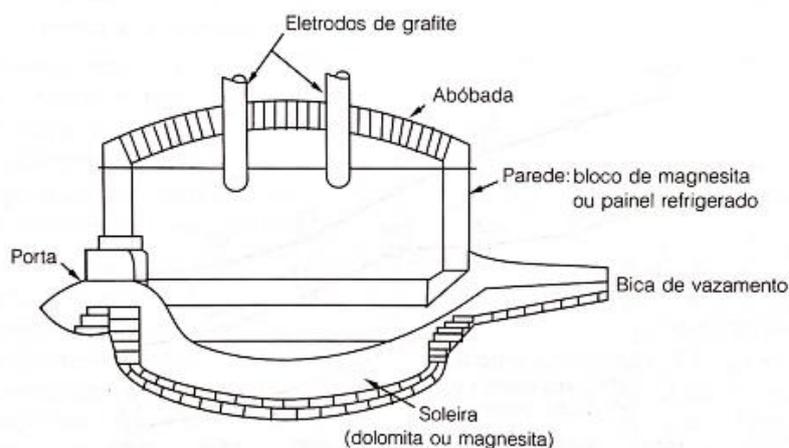


Figura 3.1: Esquema simplificado de um forno elétrico a arco de corrente alternada (SILVA; MEI, 2006)

3.3 Escórias de Aciaria Elétrica

A escória é um subproduto do processo de fabricação do aço e de suas ligas. Para cada reator ou processo metalúrgico são utilizadas escórias com diferentes características termodinâmicas e físicas. Na aciaria elétrica a escória é gerada após a fusão da carga metálica, no refino primário e no refino secundário. De forma geral, as escórias são constituídas de óxidos como CaO, SiO₂, Al₂O₃, MnO, MgO, FeO, Fe₂O₃, P₂O₅, entre outros. A Figura 3.2 apresenta típicas escórias metalúrgicas (SILVA *et al.*, 2018).

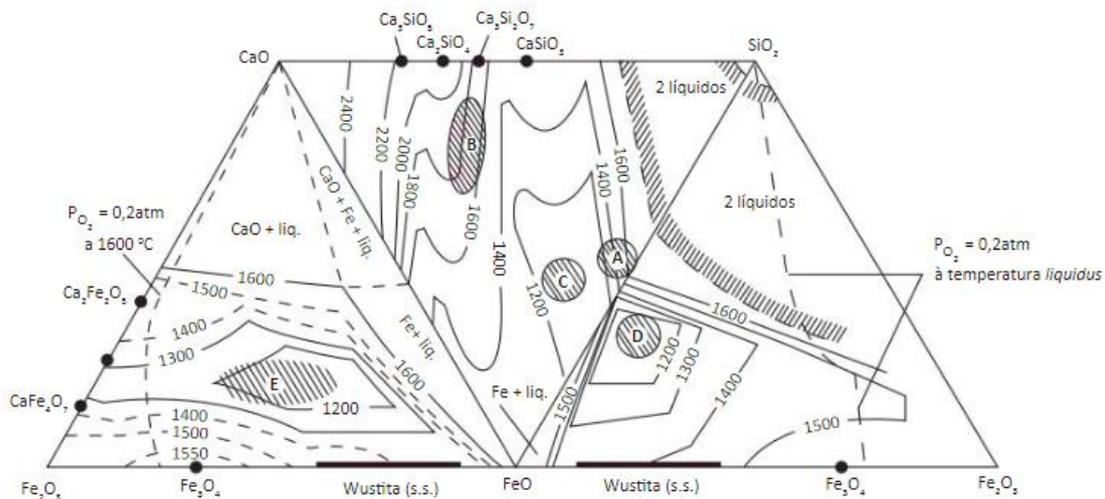


Figura 3.2: Diagrama de fases dos óxidos constituintes das escórias produzidas na aciaria elétrica (SILVA *et al.*, 2018).

Metal e escória são duas fases líquidas imiscíveis. A escória sobrenada o banho metálico, devido a sua menor densidade. O sistema metal/escória possui uma superfície de separação na qual ocorrem as trocas entre os elementos do metal e da escória, objetivando um equilíbrio definido (SILVA *et al.*, 2018).

A principal função da escória na aciaria elétrica é o refino do banho metálico, por meio da incorporação de elementos e impurezas provenientes da carga. Além disso, Rizzo (2006a) destaca outras funções da escória no processo de fabricação do aço, conforme abaixo:

- Proteção do banho metálico dificultando a interação com a atmosfera e, dessa forma, evitando a incorporação de gases como nitrogênio, oxigênio e hidrogênio.
- Redução das perdas térmicas do banho, devido ao isolamento do mesmo;
- Redução da projeção do metal durante o sopro de oxigênio;

- Absorção de inclusões não metálicas.
- Proteção do arco elétrico possibilitando a preservação dos refratários.

Na aciaria elétrica, a primeira escória é formada no forno elétrico. É produzida devido a oxidação do metal e de seus elementos de liga, causada pelo contato com o oxigênio da atmosfera ou injetado no forno e pela adição de CaO. Ela protege o banho metálico e favorece as reações de descarburização e desfosforação, realizando assim o refino primário (MOURÃO *et al.*, 2007).

Essa escória é conhecida como escória oxidante ou escória de refino primário. Neste trabalho, será referenciada como escória RP.

A descarburização (oxidação do carbono) começa com a reação direta do carbono e do oxigênio para formar CO. Nos processos usuais de fabricação de aço no FEA, é comum que se tenha uma corrida com elevado teor de carbono no fim da fusão para que, a evolução de CO provoque a agitação do banho e, com isso, homogeneização da temperatura e composição química, além da eliminação de gases por arraste (SILVA; MEI, 2006; MATSUURA *et al.*, 2008).

Ainda no refino primário, ocorre o processo de desfosforação. A remoção do fósforo é necessária pois este elemento é deletério à grande maioria dos aços, podendo formar inclusões não metálicas, segregação no contorno de grão e fragilidade a frio, comprometendo as propriedades mecânicas do material. O fósforo pode ser absorvido por escórias em condições oxidantes e redutoras, onde se formam fosfatos e fosfetos respectivamente. A desfosforação é mais viável em condições oxidantes pois, conforme ilustra o gráfico da Figura 3.3, para uma escória CaO – Al₂O₃, a formação de fosfetos exige que o banho esteja altamente desoxidado. Além disso, a elevação da basicidade da escória promove um aumento na eficiência de remoção do fósforo pois o aumento da atividade do ânion de oxigênio na escória favorece a formação dos íons ortofosfato (PO₄⁻³) (SILVA *et al.*, 2018).

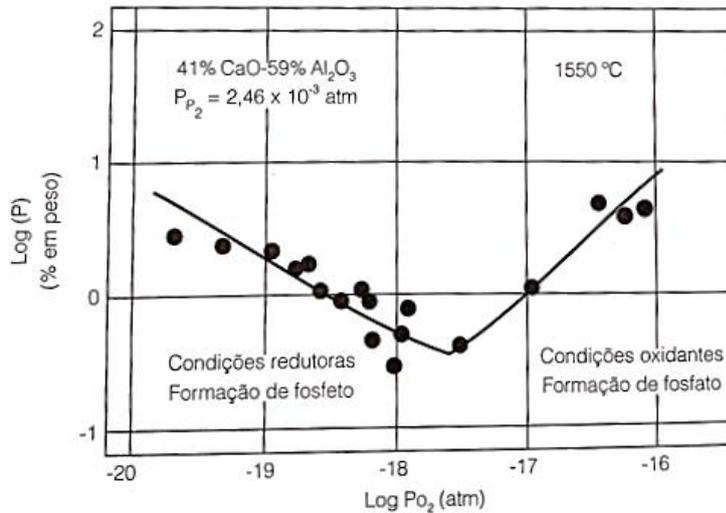


Figura 3.3: Variação do teor de P em escória CaO-Al₂O₃ em função da pressão parcial de oxigênio (SANO; LU; RIBOUD, 1997 apud SILVA; MEI, 2006).

A oxidação do fósforo, por ser uma reação exotérmica, é favorecida em temperaturas baixas ($\approx 1540^\circ\text{C}$). Dessa forma, é comum que esse processo seja realizado no fim da fusão, juntamente com a descarbonação, onde existem condições oxidantes (alto \underline{O} ou FeO) que favorecem o processo, ligadas à formação da escória espumante. É importante que se controle as variáveis termodinâmicas (especialmente a temperatura) durante a desfosforação pois pode ocorrer a reversão do P para o banho (SILVA; MEI, 2006).

Após o refino primário, com a oxidação do P, Mn, Si, C e Fe têm-se um banho com o teor de FeO elevado e a composição química da escória é, frequentemente, composta por óxidos não estáveis como FeO, MnO e óxidos ácidos como P₂O₅ e SiO₂. A escória RP é removida logo após o vazamento do metal na panela. Como o banho está desprotegido e em contato direto com a atmosfera, a oxidação do banho é iniciada instantaneamente. Para começar a formar uma nova escória e proteger o banho é adicionado CaO. Elementos desoxidantes como Si, Al e Mn também são adicionados para formar a escória de refino secundário e contribuir para os processos posteriores de dessulfuração e desoxidação do metal (MOURÃO *et al.*, 2007).

Além de ser conhecida como escória de refino secundário, a escória gerada no forno panela também é conhecida como escória redutora. Neste trabalho, será referenciada com a sigla escória RS.

O refino secundário do aço é realizado no forno panela (FP). A dessulfuração é uma das principais etapas desse processo, pois a presença do enxofre nos aços, frequentemente,

reduz a ductilidade, diminui a resistência ao impacto e à corrosão, além de ser o agente causador do fenômeno de fragilização a quente. A eficiência desse processo está na capacidade da escória de absorver os íons de enxofre. Dessa forma, a escória deve ser projetada para que se eleve sua capacidade de absorção (ROCHA, 2011).

As condições ideais para um processo de dessulfuração eficiente são as seguintes:

1. **Escórias básicas (alto O^{2-} ou CaO):** a presença de CaO objetiva o controle da basicidade e da fluidez da escória além de atribuir a escória maior capacidade de dessulfuração. O gráfico da Figura 3.4 ilustra a influência da temperatura e da concentração de CaO na capacidade de dessulfuração de uma escória $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$. O aumento da temperatura e da concentração de CaO , aumentam a capacidade sulfídica da escória (SILVA *et al.*, 2018).

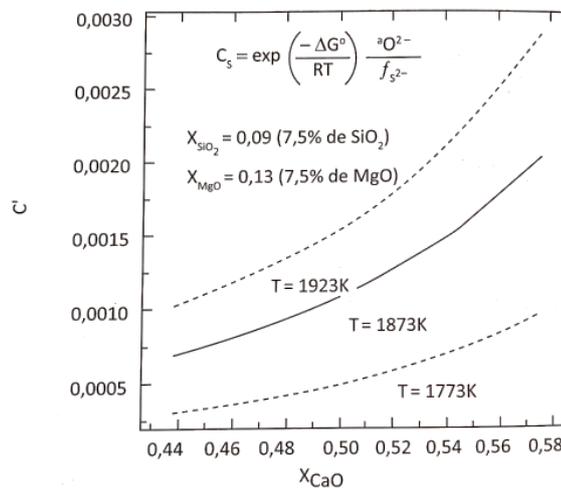


Figura 3.4: Influência da fração molar de CaO e da temperatura sobre a capacidade sulfídica de escórias $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$, a $1500^{\circ}C$ (NZOTTA; SICHEN; SEETHARAMAN, 1999 apud SILVA *et al.*, 2018).

2. **Altas temperaturas ($T > 1620^{\circ}C$):** a dissolução do CaO é favorecida em temperaturas elevadas, dessa forma, a dessulfuração é favorecida (SILVA *et al.*, 2018);
3. **Escória e banho desoxidados (baixo FeO ou O):** o gráfico da Figura 3.5 apresenta a influência do potencial de oxigênio sobre os tipos de íons enxofre na escória. Pode-se observar que, para condições redutoras, o enxofre dissolvido na escória forma íons sulfetos; para condições oxidantes, forma íons sulfatos. Fica evidente que ambientes redutores são mais eficazes para a remoção do enxofre, pois para a eliminação do enxofre através da formação de sulfatos, seria necessária

uma elevada oxidação, o que causaria uma oxidação do ferro e sua perda para a escória (SILVA; MEI, 2006).

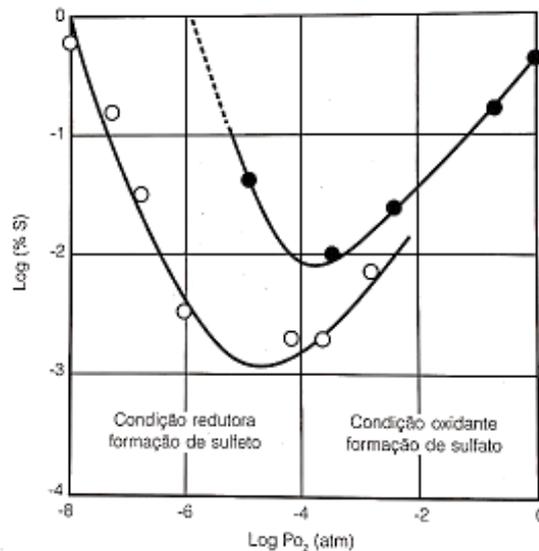


Figura 3.5: Teor de S em escórias. Pontos abertos: escórias CaO-FeO 1873K, $PSO_2=6-8\%$. Pontos pretos: CaO-FeO-SiO₂ 1773K $PSO_2=2\%$ (SANO; LU; RIBOUD, 1997 apud SILVA; MEI, 2006).

A desoxidação do banho realizada com a escória RS tem como objetivo a redução do teor de oxigênio em solução no aço. O oxigênio, apesar de possuir elevada solubilidade no aço líquido, no aço sólido sua solubilidade é mínima. Caso não seja removido, esse oxigênio pode formar FeO e comprometer a conformação a quente (devido ao baixo ponto de fusão) ou pode gerar bolhas durante a solidificação devido a formação de CO. A desoxidação é geralmente realizada adicionando elementos que possuem maior afinidade pelo oxigênio do que o Fe, como Al e Si, que formam partículas de óxidos como Al₂O₃ e SiO₂. Esses particulados devem permanecer na escória pois, caso se reincorporem no banho, podem formar inclusões não metálicas que prejudicam as propriedades mecânicas do material (SILVA; MEI, 2006).

A composição química da escória de aciaria elétrica está relacionada diretamente com o tipo de aço a ser produzido, revestimento refratário do forno e da panela e composição química da sucata. Essa composição pode ser calculada objetivando uma afinidade maior com alguns elementos ou compostos que se deseja remover do banho metálico. De forma geral, as escórias de aciaria elétrica no Brasil possuem uma composição química típica, conforme apresenta a Tabela 3.1 (GEYER, 2001).

Tabela 3.1: Composição química típica de escórias de FEA e FP

	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>MgO</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>FeO</i>	<i>MnO</i>	<i>CaO/SiO₂</i>
Escória Oxidante (FEA)	30 – 35	15 – 20	8 – 12	3 – 9	25 – 35	3 – 6	1,75 – 2,00
Escória Redutora (FP)	45 – 55	20 – 25	8 – 12	3 – 9	0,5 – 3,5	0,5 – 3,5	2,2 – 2,25

Fonte: GEYER (2001)

Além da composição química, basicidade da escória é um importante parâmetro que deve ser acompanhando durante o processo. A definição de basicidade da escória é empírica e arbitrária. A noção de ácido e básico apareceu devido à observação de que as escórias que possuem uma quantidade significativa de sílica em sua composição atacam os refratários dolomíticos ou magnesianos. Por outro lado, as escórias ricas em CaO e MgO, atacam os refratários silicosos (RIZZO, 2006a).

Os óxidos que constituem as escórias são divididos entre básicos, ácidos e anfóteros (que são aqueles que podem ser ácidos ou básicos, a depender do meio onde se encontram). Podem-se citar alguns óxidos básicos, tais como CaO, MgO, MnO, Na₂O, FeO; óxidos ácidos como SiO₂, P₂O₅, V₂O₅, B₂O₃ e, ainda, os óxidos anfóteros Al₂O₃, Cr₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂. De forma geral, os óxidos básicos são aqueles que possuem fraca atração por oxigênio e tendem a liberar o seu íon O²⁻ no banho, quebrando a rede. Os óxidos ácidos, em contrapartida, são aqueles que apresentam forte atração por oxigênio e capturam os ânions de oxigênio liberados pelas bases., sendo os formadores de rede. A Tabela 3.2 apresenta correlações empíricas que são utilizadas na prática industrial como base para a avaliação da basicidade das escórias (SILVA *et.al.*, 2018).

Tabela 3.2: Correlações empíricas de basicidade de escórias utilizadas na pratica industrial.

Basicidade binária	$\frac{\%CaO}{\%SiO_2}$
Basicidade ternária	$\frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$
Basicidade quaternária	$\frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$

Fonte: SILVA *et.al.* (2018)

A viscosidade é uma propriedade importante para as escórias devido, principalmente, ao fato estar relacionada com a velocidade das reações e com ataque dos refratários, além de influenciar na retirada da escória do forno e na eficiência da separação do metal e da escória. Essa propriedade é influenciada pela temperatura do banho e pela composição química. Comumente, no balanceamento da carga, objetiva-se uma escória com uma viscosidade adequada: nem muito elevada para não dificultar a interação da escória com o banho e nem muito baixa para evitar o ataque dos refratários (RIZZO, 2006a).

De forma geral, a viscosidade da escória líquida diminui com o aumento da basicidade. Isso se deve ao fato de que a sílica, formada por longas cadeias moleculares de íons SiO_4^{+4} torna a escória mais viscosa. Ao adicionar CaO , o óxido quebra essas cadeias por meio da formação de íons Ca^{+2} e O^{-2} , aumentando assim a fluidez da escória. A adição de MgO atua no mesmo sentido. Ainda, a presença de íons de flúor advindos da adição da fluorita (CaF_2) também promove a quebra das cadeias moleculares de silicatos, tornando a escória menos viscosa (RIZZO, 2006a).

3.4 Reutilização da Escória de Aciaria Elétrica

A siderurgia, além de utilizar matérias-primas não renováveis e de possuir um elevado consumo de energia nos seus processos, é um agente responsável por um volume considerável de emissões de gases, descarte de efluentes líquidos e de resíduos sólidos. Além da preocupação com os resíduos gerados e o seu descarte, a dificuldade em se fabricar aços com elevada qualidade e preços que compitam no mercado, devido aos crescentes custos variáveis de produção e de mão de obra, têm impulsionado estudos para transformar os resíduos gerados em coprodutos (GUZZON *et al.*, 2019).

De acordo com a *World Steel Association* (2021), para cada tonelada de aço produzido no forno elétrico a arco são gerados, em média, 170kg de escória. Dessa forma, considerando a média anual de produção de aço no país por rota FEA, pode-se considerar que são geradas cerca de $1.200 \times 10^3 \text{t/ano}$ de escória. Isso torna a escória um dos principais resíduos utilizados pela siderurgia para promover a economia circular e reduzir os custos de produção.

Inúmeros estudos vêm sendo realizados nos últimos anos a respeito do reaproveitamento de escórias de aciaria elétrica ou convencional e de altos-fornos e da destinação dessas escórias, como os citados abaixo:

- Matéria-prima utilizada na indústria de vidro e vitro-cerâmica: especialmente as escórias de alto-forno são utilizadas para essa finalidade. Após tratamento térmico das mesmas, devido ao seu alto teor de sílica e óxidos metálicos são utilizadas como substituição ao feldspato (BRANCO, 2004).
- Estabilização de solos: apesar de ser limitada pelo alto potencial de expansão da escória, sua utilização é bem-vinda nesta aplicação devido ao fato de apresentar maior rugosidade superficial, bom índice de forma, maior angulosidade, resistência ao desgaste e aumento da resistência dos solos (MACHADO, 2000).
- Matéria-prima para produção de cimento: A presença dos silicatos dicálcicos e tricálcicos (2CaO-SiO_2 e 3CaO-SiO_2) faz da escória uma forte candidata à substituição/complementação do clínquer formado na produção do cimento Portland. Além disso, substituir o calcário por escória RS traz vantagem em relação à diminuição do calor para a formação do clínquer e da redução da formação de gases poluidores (BRANCO, 2004).
- Agregado na produção de concreto: em função da elevada resistência à compressão e durabilidade à abrasão. Foi avaliada a adição de 20% de escória de aciaria elétrica em concreto. O resultado mostrou que as propriedades mecânicas avaliadas (resistência à tração na flexão e resistência à compressão) foram superiores para o concreto em que havia sido adicionada a escória reciclada, além de uma redução observada no consumo de cimento para a produção do concreto (MASUERO, 2001).
- Utilização em infraestruturas rodoviárias: utilizada como base e sub-base de pavimentos e como agregado na confecção de misturas asfálticas, sendo mais utilizada em camadas inferiores do que como agregado em revestimentos. Ainda, a escória pode ser utilizada em vias não pavimentadas para evitar a formação de poeira (BRANCO, 2004).

Nota-se, de forma geral, que as escórias têm sido destinadas, especialmente, para uso em segmentos da construção civil, agregados para pavimentação, fabricação de cimento e concreto. Um fator limitante para uso de escória RS nesses segmentos é, por exemplo, a expansibilidade causada devido à presença de óxido de cálcio livre em sua composição e

da metaestabilidade do silicato dicálcico (MASUERO; VILELA; DAL MOLIN, 2004). A Figura 3.6 esquematiza o mecanismo de desagregação da escória causado devido ao contato do óxido de cálcio livre e a umidade.

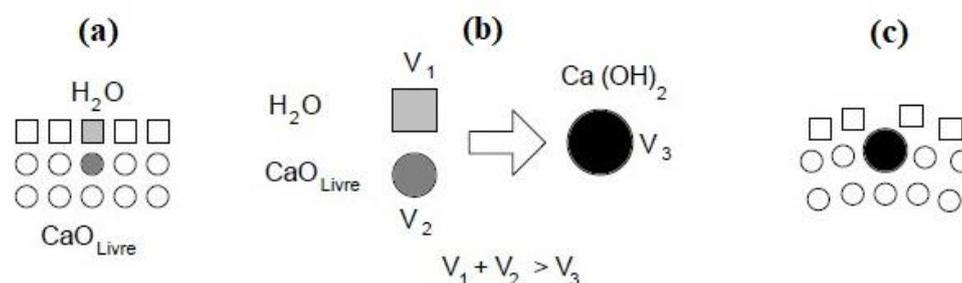


Figura 3.6: Mecanismo de desagregação da escória por meio de hidratação. Em (a) água em contato com CaO livre presente na escória. Em (b) volume inicial e final dos componentes e (c) volume ocupado pelo produto de hidratação na rede cristalina da escória (MASUERO; VILELA; DAL MOLIN, 2004).

Essa expansibilidade pode gerar consequências catastróficas, quando são usadas de forma descomedida, conforme pode ser observado nos registros fotográficos da Figura 3.7.



Figura 3.7: Manifestações patológicas decorrentes do uso de escórias de aciaria como material de adição na construção civil (MASUERO; VILELA; DAL MOLIN, 2004).

A mudança estrutural que ocorre na escória durante o resfriamento é responsável pela quebra da sua microestrutura e a transformação em pó. Isso se dá devido, principalmente, a quantidade de silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ou C_2S), presente na escória. O silicato dicálcico pode apresentar diferentes fases, como: α , α_H' , α' , β e γ . Em elevadas temperaturas, a fase α é estável. No resfriamento da escória, a fase estável passa a ser a fase β até 500°C . Abaixo dessa temperatura, a fase γ se torna estável. Essa transformação da fase β para a fase γ ocorre com um aumento de 10% no volume, resultando na fragmentação da matriz em pó, em razão das diferentes estruturas cristalinas e densidades (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006). A Figura 3.8 exemplifica essa reação de transformação.

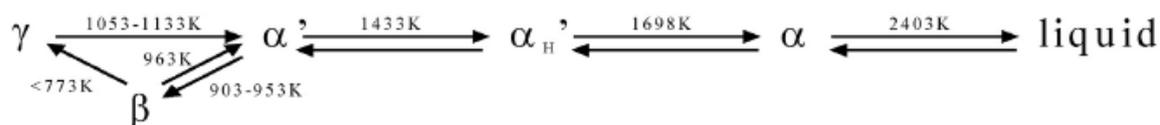


Figura 3.8: Temperaturas de transformações polimórficas do C2S – sob pressão atmosférica (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

A transformação da escória em pó, além de dificultar o transporte, é o principal problema deste resíduo do ponto de vista ambiental. Uma alternativa para contornar tal problema, seria a sua permanência na usina siderúrgica e sua reutilização nos processos da mesma. Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com esse propósito e serão apresentados abaixo.

Coelho *et al.*, (2011) realizaram um estudo para viabilizar a utilização da escória do refino secundário no forno elétrico a arco. A Tabela 3.3 apresenta o resultado da composição química da escória RS, após seu beneficiamento, onde passa a ser chamada de cal de panela.

Tabela 3.3: Composição química característica da escória do forno panela (% em peso).

CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	TiO ₂	F ₂	S
56,97	9,25	25,96	2,58	0,31	1,79	0,10	0,15	0,28	4,74	1,33

Fonte: (COELHO *et al.*, 2011).

A partir de um comparativo entre as adições de escorificantes usuais (cal dolomítica + cal calcítica) em relação a utilização com a cal de panela + cal dolomítica + cal calcítica, foi observada uma economia no uso de cal calcítica e redução no custo do processo (COELHO *et al.*, 2011).

De acordo com Guzzon *et al.*, (2019), a utilização da escória RS no forno elétrico a arco traz efeitos interessantes nas características da velocidade de formação da espuma, na densidade e basicidade da escória. Em seu estudo, foi possível comparar a diferença no fenômeno de espumação entre a escória RP com escorificantes usuais (cal + dolomita) versus a escória reciclada + cal. A Tabela 3.4 relaciona as escórias utilizadas no estudo sendo A, B, C, D e E escórias formadas com a escória reciclada e F, G, H, I e L, escórias usuais, sem reciclagem.

Tabela 3.4: Comparação da composição química de diferentes tipos de escórias RS no forno elétrico a arco.

Escória	FeO	Fe _{tot}	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	S	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
A	43,14	33,44	23,79	14,92	2,14	6,25	5,34	0,11	0,60	0,52	0,36
B	33,97	26,34	31,11	16,47	2,27	6,19	5,37	0,08	0,82	0,78	0,38
C	37,16	28,80	28,69	15,34	3,24	7,23	3,74	0,10	0,72	0,75	0,38
D	36,09	27,98	28,40	16,66	2,70	6,71	5,02	0,08	0,72	0,59	0,38
E	32,25	25,00	30,89	17,39	2,44	6,89	5,93	0,08	0,65	0,56	0,41
F	24,40	18,92	33,13	20,36	2,79	8,49	6,41	0,06	0,96	0,66	0,49
G	24,39	18,90	34,32	18,90	3,17	8,80	6,01	0,04	1,10	0,54	0,48
H	27,34	21,19	32,87	18,01	2,56	8,40	6,14	0,05	1,20	0,61	0,47
I	27,84	21,58	28,55	19,40	3,11	10,27	6,29	0,04	0,92	0,65	0,56
L	35,79	27,75	23,80	18,24	2,32	9,60	5,90	0,06	0,53	0,63	0,51

Fonte: GUZZON et al. (2019).

O estudo foi realizado em escala laboratorial. Comparações realizadas entre as escórias mostraram que as escórias recicladas tiveram um volume maior e mais estabilidade, quando comparadas àquelas não recicladas. A espumação foi favorecida para escórias com maior %FeO pois, neste experimento, o FeO foi a única fonte de oxigênio para a formação das bolhas de CO. Além disso, foi observado que a estabilidade da escória foi melhor naquelas com elevada %SiO₂ e baixa %S (GUZZON *et al.*, 2019).

Na siderúrgica italiana *Stefana SpA*, que produz cerca de 1 milhão de toneladas de fio máquina e vergalhões por ano, há uma planta protótipo, em operação desde 2005, que realiza o beneficiamento de resíduos para posterior injeção do FEA. Escórias RS e tijolos refratários gastos são a matéria prima utilizada. Ambos materiais de base instável, sujeitos a mudanças estruturais que os convertem em pó fino, portanto, o manuseio é realizado de maneira cautelosa. Para a escória RP, é feito um controle na curva de resfriamento para que o pó seja recuperado antes que atinja a temperatura ambiente e ocorra a reação de hidratação. Os tijolos refratários são triturados até que atinjam a granulometria adequada. Diferentes misturas são criadas variando a porcentagem de escória refino secundário e tijolos refratários triturados para que seja atingida a melhor ‘fórmula’ a ser utilizada no FEA. Desta forma, com base no tipo de aço a ser produzido (limitação de qualidade para cada elemento químico no aço líquido), e com base no modelo metalúrgico implementado no sistema de automação (capaz de determinar a interação entre escória RP e o aço e a possível coleta de elementos químicos indesejáveis), o modelo calcula automaticamente a quantidade certa de material reciclado que pode ser adicionado à escória RP sem

comprometer a qualidade do aço. A mistura em pó é injetada, diretamente na linha da escória, garantindo que o sistema de despoejamento não aspire as partículas (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

Uma cooperação entre a Techint e o Departamento de Mecânica da universidade italiana *Politecnico di Milano* desenvolveu um modelo metalúrgico capaz de calcular as mudanças nos materiais de entrada e saída no FEA quando se utiliza escória reciclada. Utilizando conceitos de atividade dos elementos e do oxigênio, o modelo simula a formação de compostos na escória a partir da composição química da mesma e estima a quantidade de cal que pode ser economizada no carregamento do FEA (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

Para validar o modelo, amostras foram coletadas em um número significativo de corridas, na usina da *Stefana SpA* que, conforme informado anteriormente, já realiza um processo de reutilização de escórias e tijolos refratários. A primeira amostra foi retirada diretamente no forno panela e a segunda foi retirada já resfriada após a panela ser vertida. Foram realizadas análises químicas dos compostos encontrados. A Tabela 3.5 apresenta os resultados da análise química das escórias RS quando foi utilizada a escória reciclada a partir de escória RS e tijolos refratários; a escória usualmente utilizada na empresa e o mix das duas (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

Tabela 3.5: Resultados de análise química das amostras das escórias geradas

Compostos	Escória reciclada (%)	Mix (%)	Escória usual (%)
CaO	50,8	46,9	50,2
SiO₂	18,5	20,8	19,8
Al₂O₃	13,6	17,2	17,5
MgO	3,5	4,2	4,0

Fonte: MEMOLI; MAPELLI; GUZZON (2006).

A Tabela 3.6 exhibe os resultados médios da análise dos compostos encontrados na escória coletada na usina e a Tabela 3.7 apresenta os valores médios da análise química dos compostos encontrados na escória do modelo metalúrgico (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

Tabela 3.2: Análise dos compostos encontrados na escória via sonda EBSD

Compostos	%
3CaO.Al ₂ O ₃	34
CaO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	24
3CaO.SiO ₂	11
2CaO.SiO ₂	8
2FeO.MgO	1
Nenhum	14

Fonte: MEMOLI; MAPELLI; GUZZON (2006)

Tabela 3.3: Análise dos compostos encontrados na escória do modelo metalúrgico

Compostos	%
3CaO.Al ₂ O ₃	32
CaO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	17
3CaO.SiO ₂	11
2CaO.SiO ₂	7
2FeO.MgO	1
2MgO.SiO ₂	6

Fonte: MEMOLI; MAPELLI; GUZZON (2006)

Comparando os resultados do modelo com a análise média dos compostos, nota-se semelhança considerável. De acordo com os autores, a simulação metalúrgica com os dados da *Stefana SpA* indicou que é possível reciclar cerca de 1600kg/corrida de escória à mistura do pó na escória do FEA, tendo uma economia de, aproximadamente, 800kg de cal por corrida. Esse valor significa cerca de 15% do custo da cal. A aplicação deste modelo para a *Stefana* indicou que o custo total do investimento seria pago em, pelo menos, 3 anos (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

O estudo realizado na *Stefana* foi consequência de pesquisas feitas na *Ferriere Nord*, onde a prática de reutilização da escória RS no FEA tem sido realizada desde 2004. Na *Ferriere Nord*, foram utilizadas diferentes taxas de escória reciclada, a depender do tipo de aço utilizado. Para aço de concreto armado, o que corresponde a 70% da produção da planta, foram utilizados cerca de 1800kg/corrida; para os demais, cerca de 1200kg/corrida. A utilização deste material reciclado permitiu à planta a redução da cal normal na carga em cerca de 1000kg/corrida a 1200kg/corrida, poupando cerca de 30% do custo da cal (MEMOLI; MAPELLI; GUZZON, 2006).

Além da reutilização da escória RS como complemento aos escorificantes, há estudos que se concentram na recuperação do ferro das escórias RP. Souza (2017), caracterizou 3

sucatas recuperadas provenientes do processo de fusão no FEA utilizando técnicas laboratoriais para avaliação das composições, fases e rendimento das mesmas. Uma dessas sucatas apresentou uma %Fe interessante e foi adicionada gradativamente como carga inicial no FEA. Após análises, pode-se notar uma redução de custos significativa, fazendo com que cerca de 25% da carga fria do FEA tenha sido substituída pela sucata recuperada (SOUZA, 2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Obtenção da Escória de Refino Secundário

Durante o processo de fabricação do aço, no refino secundário, é gerada a escória RS, que tem como principais funções a proteção do banho e a absorção de inclusões. Para o presente trabalho, foram utilizadas 4 toneladas de escória RS, coletadas de corridas realizadas no período de outubro/2021 a novembro/2021 na aciaria convencional da *Villares Metals*. Essas corridas são referentes ao mix de produção da célula, que contempla a fabricação de aços construção mecânica, aços ferramenta, aços válvulas e aços rápidos.

Em cada corrida são geradas, em média, 1000kg de escória RS. Após o processamento do material no forno panela, uma fração dessa escória é removida e o restante segue na panela, que é transferida para o lingotamento convencional. Ao final do lingotamento, certa quantidade de escória e aço permanecem no fundo da panela e são vertidos em um pote de escória. Essa escória é o objeto de estudo desse trabalho.

O pote de escória foi transportado até um galpão protegido de umidade e os materiais remanescentes foram basculados e estocados até que se resfriassem ao ar natural. Após resfriados, esses materiais foram transferidos para uma área onde foi feita a separação manual da escória e do aço. As escórias foram colocadas em 4 bags de 1000kg e estocadas para posterior análise química e de umidade. O aço residual foi classificado de acordo com a composição química e retornou para o pátio de matérias-primas (sucatas), para posterior utilização no processo. A Figura 4.1 apresenta o registro fotográfico de um dos bags e da escória coletada.



Figura 4.1: Bag de escória e escória coletada. (AUTORA, 2021)

4.2 Caracterização da Escória

As análises químicas foram realizadas no equipamento MAGIX FAST, pelo método de fluorescência de raios-x, no laboratório de análises químicas da Villares Metals. Foram utilizadas 21,2 gramas para a análise. No método de fluorescência de raios-x, a irradiação de uma determinada substância através de um feixe de raios X emitido por um tubo operando em alta pressão, produz uma radiação secundária (fluorescência) característica dos elementos presentes nessa fase. Sabendo a intensidade e o comprimento de onda dos raios-x fluorescentes, permite-se a identificação dos elementos presentes e garante-se uma análise quantitativa desses elementos (ROCHA, 2011).

A análise de umidade foi realizada pelo método de secagem em estufa, que se baseia na remoção da água por aquecimento. Nesse método, a amostra é aquecida e a perda de peso devido à evaporação da umidade é registrada.

4.3 Testes de Reutilização da Escória de Refino Secundário no FEA

Após a caracterização química e de umidade, as escórias coletadas foram encaminhadas para a aciaria, onde foram adicionadas em 4 corridas distintas, em um forno elétrico a arco, com capacidade de 35t de aço. O tempo médio de operação do forno é de 2h a 2h30min.

As escórias foram adicionadas no início da fusão, como complemento aos escorificantes em corridas de aço ferramenta, na proporção em peso de 1:1 (escória reutilizada:cal). Amostras da composição química da escória primária gerada no FEA foram retiradas após o vazamento do metal líquido no forno panela, a fim de obter um resultado mais homogêneo.

A caracterização da composição química desta escória primária gerada também foi realizada pelo método de fluorescência de raios-x no equipamento MAGIX FAST.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Composição Química da Escória de Refino Secundário

A Tabela 5.1 apresenta a composição química encontrada após a caracterização das escórias de refino secundário obtida pelo método de fluorescência de raios-x. Cada amostra corresponde às retiradas de um bag de escória de, aproximadamente, 1000kg.

Tabela 5.1: Composição química após caracterização das escorias

% em peso	Amostras			
	1	2	3	4
CaO	44,90	42,50	41,90	39,10
SiO ₂	17,30	22,26	21,57	19,80
Al ₂ O ₃	16,39	13,81	13,90	14,67
CaF ₂	5,57	6,57	7,45	5,02
MgO	8,52	9,35	9,66	9,39
Fe ₂ O ₃	4,36	2,93	2,56	7,20
Cr ₂ O ₃	1,57	1,24	1,32	2,21
MnO	0,79	0,65	0,70	1,43
P ₂ O ₅	0,041	0,026	0,031	0,048
Outros	0,56	0,67	0,91	1,13
Basicidade	2,59	1,90	1,94	1,97
H ₂ O	0,18	0,15	0,20	0,17

Nota-se, pela análise química, que a escória de refino secundário apresentou certa variação em sua composição química. Essa variação pode ser justificada em decorrência da matéria prima utilizada para cada corrida, de elementos que são incorporados à mesma durante o processo e, ainda, do tipo de aço no qual ela foi gerada, uma vez que essa escória não representa escória de refino de um aço específico e sim do mix de produção.

Observa-se que o CaO e o SiO₂ são os compostos que apresentaram maiores teores na composição química da escória. Isso se dá devido ao importante papel que ambos exercem nas propriedades da escória. Foram encontrados valores de basicidade binária na faixa de 1,9 a 2,5. Esses valores estão dentro do esperado, considerando que a basicidade binária de escórias utilizadas no refino secundário situa-se na faixa de 1,8 a 3,5 (RIZZO, 2006b).

Um teor elevado de Al₂O₃ também foi encontrado na análise química das escórias, quando comparado com dados da Tabela 3.1. Conforme já mencionado, as escórias de refino secundário utilizadas são provenientes de refino de vários tipos de aços. O teor elevado

de Al pode ser justificado devido ao fato de que algumas corridas, nas quais a escória foi coletada, foram acalmadas ao Al.

Em todas as 4 amostras observa-se teores elevados de Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO e P_2O_5 . Pode-se considerar que houve contaminação da escória de refino primário com a escória de refino secundário pois, usualmente, de acordo com o histórico de produção da aciaria da empresa, são esperados teores de P abaixo de 0,020% e valores típicos da somatória $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}$ e Cr_2O_3 abaixo de 1,50%.

Os resultados de umidade demonstrados na tabela em termos de teor de H_2O indicam que a escória de refino secundário coletada estava dentro dos padrões esperados ($< 0,2\%$) o que garante que o processo seja seguro para a operação.

5.2 Características da Escória Gerada no Refino Primário

As escórias de refino secundário coletadas (escórias reutilizadas) foram adicionadas na proporção de 1:1 (escória reutilizada:cal) em 4 corridas diferentes. Em todas as corridas foram adicionados coque e FeSi.

Após a utilização da escória de refino secundário coletada, juntamente com as outras adições, foram retiradas uma amostra de cada escória de refino primário, gerada após o vazamento para a panela, em cada uma das 4 corridas e os resultados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 5.2: Composição química das escórias reutilizadas e geradas no refino primário

% em peso	Corridas							
	1		2		3		4	
	Reutilizada	Gerada	Reutilizada	Gerada	Reutilizada	Gerada	Reutilizada	Gerada
CaO	44,90	33,03	42,50	28,42	41,90	27,37	39,10	34,38
SiO₂	17,30	28,88	22,26	31,50	21,57	36,10	19,80	34,14
Al₂O₃	16,39	5,18	13,81	9,34	13,9	9,22	14,67	8,07
MgO	8,52	13,44	9,35	9,50	9,66	15,02	9,39	12,24
Fe₂O₃	4,36	3,00	2,93	2,34	2,56	1,03	7,2	0,63
CaF₂	5,57	6,20	6,57	6,20	7,45	< 5,00	5,02	< 5,00
Cr₂O₃	1,57	7,10	1,24	8,54	1,32	3,80	2,21	3,48
MnO	0,79	1,47	0,65	2,18	0,7	0,96	1,43	1,06
P₂O₅	0,041	0,018	0,026	0,006	0,031	0,005	0,048	0,008
Outros	0,56	1,69	0,67	1,97	0,91	1,49	1,13	1,02
Basicidade binária	2,6	1,14	1,91	0,90	1,94	0,76	1,97	1,01
Basicidade quaternária	1,59	1,36	1,44	0,93	1,45	0,94	1,41	1,1

Por se tratar das primeiras corridas, ainda em fase de testes e, portanto, necessitando de ajustes no processo, pode-se observar que as corridas 1 e 2 apresentaram um grau de oxidação maior na escória, especialmente do Cr_2O_3 . Já nas corridas 3 e 4, nota-se uma melhora no processo de desoxidação da escória, a partir da composição química dos óxidos MnO , Cr_2O_3 e Fe_2O_3 .

A basicidade e a viscosidade da escória estavam dentro do padrão usual do processo.

Apesar da mistura entre escória de refino primário e escória de refino secundário, que elevou o teor de P da escória coletada, observa-se que o teor de P encontrado na escória de refino primário foi baixo. Ainda, avaliando a composição química do banho com o histórico esperado para a liga, percebe-se que não houve incorporação de P no mesmo: as corridas testes ficaram com teor de P entre 0,024% e 0,026%. A média para a liga em questão é 0,025%.

5.3 Consumo Energético e de Cal

O gráfico da Figura 5.1 apresenta, em termos de porcentagens, o consumo energético das corridas FEA com a escória reciclada, em comparação com o consumo usual de energia para a liga utilizada nos testes (linha tracejada).

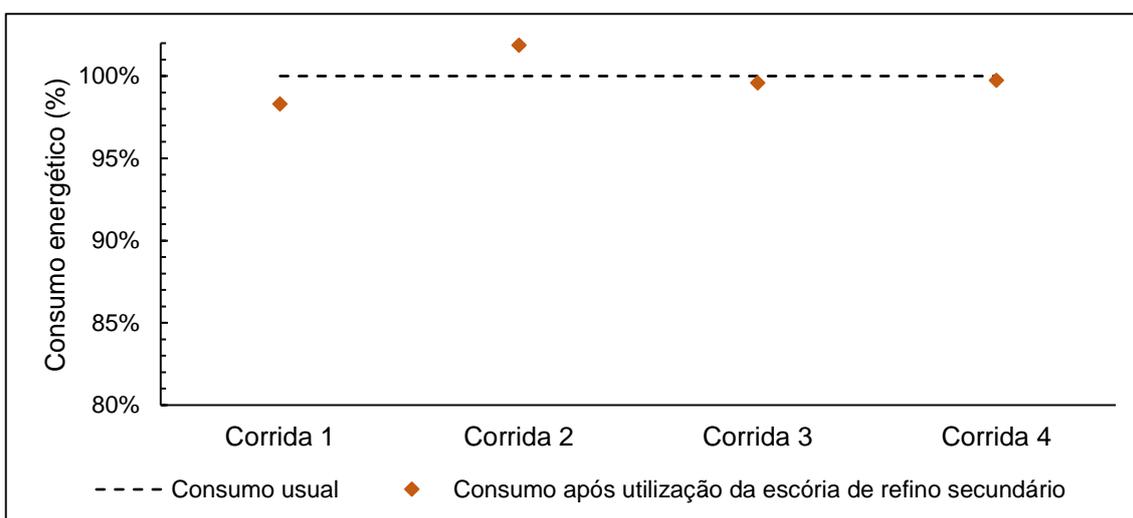


Figura 5.1: Comparativo do consumo energético usual com o consumo real das corridas testes.

Pode-se observar que não houve uma variação significativa no consumo de energia. A manutenção no consumo médio de energia é interessante para evitar aumentos nos custos de produção. E assim, a reutilização da escória se mantém vantajosa.

O gráfico da Figura 5.2 apresenta, em termos de porcentagens, a adição de cal realizada nas corridas que utilizaram a escória de refino secundário como complemento aos escorificantes no FEA em comparação com a adição usual feita para a liga, utilizada nos testes (linha tracejada).

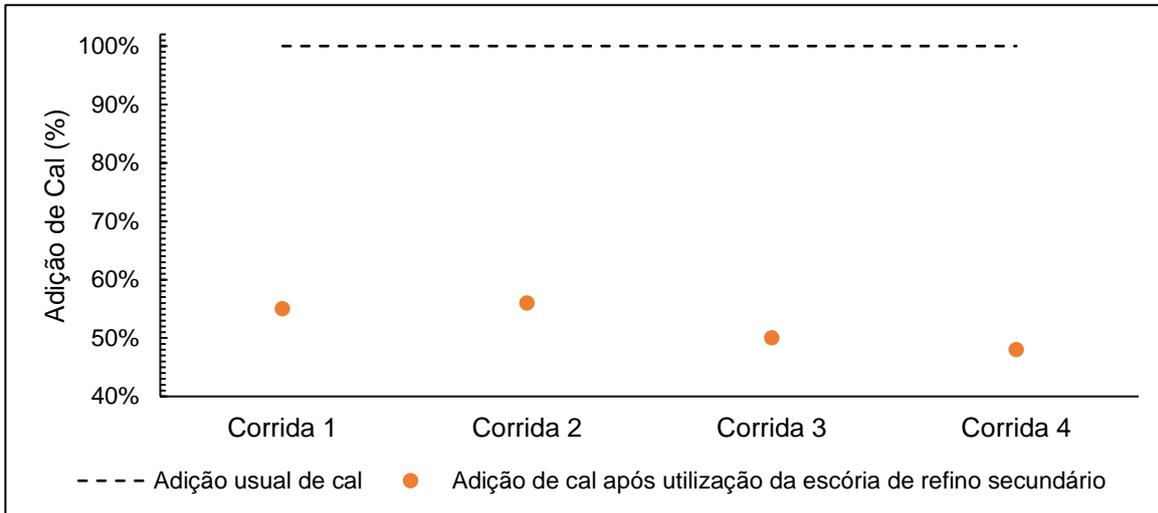


Figura 5.2: Comparativo da adição usual de cal com a adição de cal utilizada nas corridas testes

É possível notar que houve uma redução, em média, de 50% do consumo de cal, considerando que a porcentagem adicionada nas corridas ficou entre 48% e 55%, se comparado com padrão de adição.

6 CONCLUSÕES

As caracterizações das amostras realizadas por fluorescência de raios-x indicaram a presença de compostos necessários para a viabilidade de utilização da escória de panela do refino secundário no forno elétrico a arco, durante o refino primário, como CaO e SiO₂.

A baixa umidade encontrada nas amostras das escórias de panela indica a preocupação e cuidado na estocagem desse material, para garantir o seu uso no processo do forno elétrico a arco sem riscos operacionais.

A escória gerada no FEA, após o uso da escória reciclada, apresentou uma composição química que demonstra que o processo de reutilização da escória é viável para a empresa, a destacar: Cr₂O₃ < 5%, Fe₂O₃ < 5% e basicidade > 1.

Não houve incorporação de P nas corridas FEA uma vez que, a média de P para a liga utilizada nos testes é de 0,025% e a análise da composição química dessas ligas das corridas testes indicaram um teor de P entre 0,024% e 0,026

Em termos de consumo de energia, não foi observado um aumento no consumo, o que mantém a utilização da escória reciclada interessante e vantajosa.

Em relação a cal, a utilização da escória coletada no refino secundário como complemento aos escorificantes no refino primário permitiu a redução de cerca de 50% do consumo de cal.

Sugere-se a continuação dos estudos e testes, bem como a análise de outras variáveis como desgaste de refratários e espumação da escória, a fim de compreender melhor o comportamento desse resíduo, quando utilizado nesta aplicação. Além disso, sugere-se melhor separação da escória de panela de refino secundário, para evitar a contaminação com outros resíduos do processo.

Os resultados alcançados nos testes foram satisfatórios, considerando que foram os primeiros realizados na usina da *Villares Metals*. Com a continuação dos estudos e manutenção dos bons resultados, será interessante para a empresa tornar a reutilização da escória de refino secundário um padrão, promovendo economia circular, contribuindo para a diminuição do impacto ambiental e reduzindo custos de produção.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G.T. A Ascensão das Mini-Mills no Cenário Siderúrgico Mundial. **BNDES Setorial**, v. 12, p. 51-76, 2000.

BRANCO, V. T. F. C. **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. 2004. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

COELHO, M. T. S. F.; CAMPOS, J. M. G.; AMARAL, E. A.; ELIAS, F. T.; GRANADO, E.; PEREIRA, L. J. C.; ARAÚJO, J. A. Reciclagem de cal de panela no forno elétrico a arco da Arcelormittal Piracicaba. *In: SEMINÁRIO DE ACIARIA – INTERNACIONAL*, 42, 2011, Salvador.

FOSTER, A.; ROBERTO, S. S.; IGARI, A. T. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE*. São Paulo, 2016.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. 2001. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

GUZZON, M.; MAPELLI, C.; SAHAJWALLA, V.; SAHA-CHAUDHURY, N.; MEMOLI, F.; PUSTORINO, M. The behaviour of the secondary metallurgy slag into the EAF. How to create a good foamy slag with the appropriate basicity using a mix of lime and recycled ladle slag as EAF slag former. *In: Proceedings of the 38th Seminário de Aciaria, Belo Horizonte, Brasil*, v. 14, 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2019/08/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf. Acesso em: 12 set. 2021.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. 2000. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MASUERO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. 264 f. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. C. C. Estabilização e viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria elétrica. **Ambiente Construído**, v. 4, n. 2, p. 57-81, 2004.

MATSUURA, H.; MANNING, C. P.; FORTES, R. A. F. O.; FRUEHAN, R. J. Development of a decarburization and slag formation model for the electric arc furnace. **ISIJ International**, v. 48, n. 9, p. 1197-1205, 2008.

MEMOLI, F.; MAPELLI, C.; GUZZON, M. Recycling of ladle slag in the EAF: A way to improve environmental conditions and reduce variable costs in the steel plants. The results of Stefana SpA (Italy). **AISTech 2006 Proceedings**. p. 1171-1179, 2006.

MOURÃO, M. B. *et al.* **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: ABM, 2007.

NZOTTA, M. M.; SICHEN, D.; SEETHARAMAN, S. A study of the sulfide capacities of iron-oxide containing slags. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 30B, p. 909-920, 1999.

RIZZO, E.M. da S. **Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco**. São Paulo: ABM, 2006a.

RIZZO, E.M. da S. **Introdução aos Processos de Refino Secundário dos Aços nos Fornos Elétricos a Arco**. São Paulo: ABM, 2006b.

ROCHA, B. P. **Estudo da Viabilidade da Reutilização da Escória do Refino Secundário no Forno Elétrico a Arco**. 2011. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SANO, N.; LU, W. K., RIBOUD, P. V. Thermodynamics of slags. *Advanced Physical*

Chemistry for Process Metallurgy. San Diego: Academic Press, 1997.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** 2. ed. São Paulo: Blücher, 2006.

SILVA, C. A.; SILVA, I. A.; CASTRO, L. F. A.; TAVARES, R. P.; SESHADRI, V. **Termodinâmica Metalúrgica: balanços de energia, soluções e equilíbrio químico em sistemas metalúrgicos.** São Paulo: Blucher, 2018.

SOUZA, E. E. B. **Caracterização de Sucata Recuperada a partir de Escórias Siderúrgicas e sua Utilização em um Forno Elétrico a Arco.** 2017. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação e Engenharia Metalúrgica) Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de Sustentabilidade: uma análise comparativa.** 2002. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **Steel Facts.** Disponível em: <https://www.worldsteel.org/about-steel/steel-facts.html>. Acesso em: 3 out. 2021.