

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA NO DESEMPENHO
E VIDA ÚTIL DO REVESTIMENTO REFRAATÓRIO DE
FORNOS PANELAS DE ACIARIAS**

Gustavo Ramos Calixto

Lucas Alves Freitas

**Pindamonhangaba - SP
2025**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA NO DESEMPENHO
E VIDA ÚTIL DO REVESTIMENTO REFRACTÁRIO DE
FORNOS PANEIS DE ACIARIAS**

Gustavo Ramos Calixto

Lucas Alves Freitas

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de Tecnologia
em Processos Metalúrgicos.

Orientador(a): Me. Amir Rivaroli Junior.

**Pindamonhangaba - SP
2025**

R000e CALIXTO, G. R. FREITAS, A. F.

Processos Metalúrgicos: Análise da influência da escória no desempenho e vida útil do revestimento refratário de fornos
painéis de aciarias/ Gustavo Ramos Calixto; Lucas Alves Freitas/
FATEC Pindamonhangaba, 2024.
f.: il.; 30 cm.

Orientador Prof. Me. Amir Rivaroli Junior.
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba. 2024.

1. Processo Metalúrgicos. 2. Revestimento Refratário. 3.
Escória. 4. Fornos Siderúrgicos. 5. Siderurgia. Rivaroli
Junior, Amir.

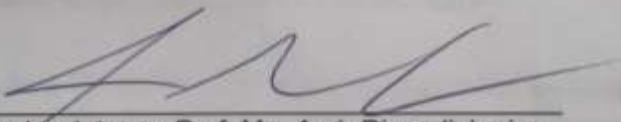
CDU 620.193

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

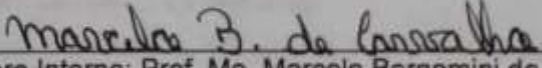
**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESCÓRIA NO
DESEMPENHO E VIDA ÚTIL DO REVESTIMENTO
REFRATÁRIO DE FORNOS PANELAS DE ACIARIAS**

**Gustavo ramos Calixto
Lucas Alves Freitas**

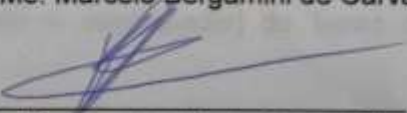
Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Processos Metalúrgicos.



Membro Interno: Prof. Me. Amir Rivaroli Junior
Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba



Membro Interno: Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho



Membro Externo: Eng. Rodrigo André de Souza Ribeiro

Pindamonhangaba, 04 de julho de 2025.

DEDICATÓRIA

Gustavo Ramos Calixto

Dedico este trabalho à minha família, pilar de força e inspiração em cada desafio da jornada acadêmica. Em especial, à minha mãe, por cada lição de resiliência e pelo apoio que me trouxe até aqui.

Lucas Alves Freitas

Dedico este trabalho a todos que caminharam comigo ao longo dessa jornada. Em especial, a minha esposa e meu filho, exemplo de força e persistência, e aos amigos que estiveram presentes com palavras de incentivo e apoio nos momentos mais desafiadores.

AGRADECIMENTOS

Gustavo Ramos Calixto

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir chegar até aqui com saúde e coragem. Agradeço também à minha família, pelo apoio constante e por compreenderem minhas ausências nos momentos de dedicação aos estudos. Aos professores que compartilharam conhecimento e inspiraram meu crescimento, minha sincera gratidão.

Lucas Alves Freitas

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo incentivo e compreensão durante toda essa caminhada. À minha família, por nunca deixar faltar apoio e palavras de encorajamento. Aos docentes e colegas de curso, por contribuírem com o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

“A primeira regra de qualquer tecnologia utilizada nos negócios é que a automação aplicada a uma operação eficiente aumentará a eficiência. A segunda é que a automação aplicada a uma operação ineficiente aumentará a ineficiência.”

GATES, B. A Estrada do Futuro. São Paulo:
Companhia das Letras, 1995.

CALIXTO, G. R.; FREITAS, L. A. Análise da influência da escória no desempenho e vida útil do revestimento refratário de fornos painelas de aciarias. 2025. 52 p. Trabalho de Graduação (Curso Superior de Tecnologia em Processos Metalúrgicos). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

RESUMO

Os principais custos da operação de fornos siderúrgicos para obtenção de aço estão ligados a disponibilidade dos canais para o esgotamento do forno, à sua segurança, além da manutenção e custos específicos relacionados aos revestimentos refratários. Desta forma, esta pesquisa delimitou-se a debater tanto o desgaste promovido entre o desgaste na linha de gusa, interface entre o banho de gusa e o banho de escória, como o da linha de escória, que ocorre na região de contato entre a escória e o refratário, ao analisar a influência da qualidade da escória. Portanto, o objetivo principal foi analisar a influência da qualidade da escória no desempenho e vida útil do revestimento refratário de painelas de aciarias. Para tanto, a metodologia empregada foi o estudo de caso qualitativo alicerçado por uma pesquisa bibliográfica sobre os principais temas transversais necessários para responder o problema da pesquisa e contemplar o objetivo geral e específicos. Assim, como principal resultado que os mecanismos de desgaste de refratários referente a qualidade da escória podem variar dependendo da basicidade binária(B2) e do teor de ferro, que no nível das amostras se mostram ideias para a operação realizada na empresa, ou seja, B2 entre 2,15 e 2,50, e teor de ferro 1,30 e 1,35 para que se possa ter uma melhor proteção dos refratários de fornos painelas. Por fim, constatou-se que que a gestão eficaz do desgaste do revestimento refratário pode trazer um impacto positivo a produção, a qualidade do aço e a segurança dos trabalhadores e, consequentemente, levar a otimização das operações no forno panela.

Palavras-chave: Revestimento Refratário. Escória. Fornos Siderúrgicos. Siderurgia.

CALIXTO, G. R.; FREITAS, L. A. Analysis of the influence of slag on the performance and useful life of the refractory lining of steel mill ladle furnaces. 2025. 52 p. Graduation Work (Technology Course in Metallurgical Processes). Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

ABSTRACT

The main operational costs of steelmaking furnaces for obtaining steel are associated with the availability and safety of the furnace tapping channels, in addition to maintenance and specific costs related to the refractory linings. Therefore, this research was delimited to discussing the wear that occurs at both the hot metal line—the interface between the hot metal and slag baths—and the slag line, which is the contact region between the slag and the refractory, by analyzing the influence of slag quality. Thus, the primary objective was to analyze the influence of slag quality on the performance and service life of the refractory lining of steelmaking ladle furnaces. To this end, the methodology employed was a quali-quantitative case study, supported by a literature review on the main cross-cutting themes necessary to address the research problem and fulfill the general and specific objectives. The main result indicates that the refractory wear mechanisms related to slag quality can vary depending on the binary basicity (B2) and the iron content. At the sample level, the ideal conditions for the company's operation were found to be a B2 value between 2.15 and 2.50, and an iron content between 1.30% and 1.35%, in order to achieve better protection for the ladle furnace refractories. Finally, it was concluded that the effective management of refractory lining wear can positively impact production, steel quality, and worker safety, consequently leading to the optimization of ladle furnace operations.

Keywords: Refractory Coating. Slag. Steel Furnaces. Steel industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de fabricação do aço e ferro no setor siderúrgico.....	19
Figura 2 – Esquema de fornos utilizados no setor siderúrgico	21
Figura 3 – Estrutura do Forno Pãela	22
Figura 4 – Ciclo operacional em um forno siderúrgico	24
Figura 5 - Esquema funcional de um forno panela elétrico (Ladle Furnace – LF).....	27
Figura 6 – Benefícios da escoria espumante.....	34
Figura 7 – Estrutura metodológica da pesquisa	37
Figura 8 – Layout da aciaria universo da pesquisa	38
Figura 9 – Equipamento raio-x para análise de escória e a interfase de dados	39
Figura 10 - Imagem de uma panela de aciaria com seu revestimento interno exposto, sem nenhuma proteção.....	46
Figura 11 - Imagem de uma panela de aciaria com o revestimento protegido, não é possível ver a delimitação entre os tijolos.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução do índice de desgaste do refratário	45
Gráfico 2 – Prospecção da evolução do número de corridas	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das amostras de escória analisadas	42
Tabela 2 – Dados analíticos das amostras de escória	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3 – Composição das amostras de escória analisadas.....	42
Tabela 4 – Dados de desgastes do refratário – Amostra 1.....	43
Tabela 5 – Dados de desgastes do refratário – Amostra 2.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Controle das operações de produção em alto-forno.....	25
Quadro 2 – Relação entre tipo de forno, liga e refratário na região do forno.....	28
Quadro 3 – Índices de basicidade usados na prática industrial.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	155
1.1 PROBLEMA.....	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 FORNOS SIDERÚRGICOS NA PRODUÇÃO DE AÇO	18
2.2 REVESTIMENTO REFRACTÁRIO DE FORNOS PANELAS DE ACIARIAS.....	266
2.3 A IMPORTÂNCIA DA ESCÓRIA PARA O DESEMPENHO E VIDA ÚTIL DO REVESTIMENTO REFRACTÁRIO EM FORNOS SIDERÚRGICOS	28
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	377
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 RESULTADOS.....	42
4.2 DISCUSSÃO	477
5 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS.....	511

1 INTRODUÇÃO

A escória é um subproduto gerado durante o processo de fusão na produção siderúrgica, interagindo diretamente com os materiais refratários que revestem o interior dos fornos, influenciando aspectos como isolamento térmico, resistência ao desgaste e resistência à corrosão (SANTOS, 2015). A composição química da escória, frequentemente complexa e variável, constitui uma das variáveis mais relevantes para garantir o bom desempenho e a longevidade dos refratários utilizados em fornos panela nas aciarias (GASPARINI, 2016).

Nesse contexto, tornam-se necessários estudos que avaliem detalhadamente a composição química da escória, pois ela pode não apenas intensificar processos corrosivos nos materiais refratários, reduzindo sua vida útil, como também impactar diretamente a qualidade final do aço produzido (COTTA; RODRIGUES, 2014).

Portanto, busca-se fomentar a discussão sobre a influência da qualidade da escória no desempenho e na vida útil dos refratários de um forno panela em uma aciaria. Para tanto, se analisou e discorreu sobre composição química, viscosidade, temperatura de operação e outros fatores ligados a escória que interagem de maneira complexa e afetam a corrosão, o desgaste e a resistência dos refratários, como forma de otimizar a eficiência operacional e a qualidade do aço, além de reduzir os custos de manutenção dos fornos panelas.

Assim, a pesquisa proposta terá como objetivo avaliar a influência de diferentes composições de escória tanto no desempenho do processo considerando-se a qualidade do aço obtido quanto na durabilidade dos revestimentos refratários, buscando identificar a composição química que resulte em menor frequência de substituições. Essa otimização contribui diretamente para a redução dos custos operacionais e de manutenção na produção siderúrgica (TÂMEGA, 2017).

Desta maneira, buscou-se na pesquisa colaborar para uma melhor compreensão sobre a influência da composição e das propriedades da escória, bem como a forma como ela interage com o aço líquido para garantir a produção de aço de alta qualidade, com as propriedades desejadas para aplicações específicas. Com isso, pretende-se evidenciar a influência de se avaliar a escória para a otimização de umas das variáveis que podem afetar a qualidade deste importante processo metalúrgico para obtenção do aço.

Por fim, acredita-se que ao considerar que a escória desempenha um papel

crucial na produção de aço e pode influenciar significativamente a sua qualidade, torna-se necessário um melhor entendimento não só sobre a composição química, mas também, sobre todos os fatores que tornam as análises e a padronização para seu desempenho eficiente na produção de aço ainda mais complexa.

1.1 Problema

A baixa qualidade da escória em fornos siderúrgicos pode levar a vários problemas, como dificuldades no processo de fusão e refino do metal, menor eficiência energética, aumento da corrosão e desgaste do refratário, além de impactos negativos na qualidade do aço produzido. Ademais, uma escória de baixa qualidade pode resultar em emissões de gases nocivos e prejudiciais ao meio ambiente durante o processo de produção metalúrgico.

Com esse pressuposto, a pesquisa buscou responder ao seguinte problema: Qual a influência da qualidade da escória no desempenho e vida útil do revestimento refratário de fornos panelas de aciarias?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a influência da qualidade da escória no desempenho e vida útil do revestimento refratário de fornos panelas de aciarias.

1.2.2 Objetivos específicos

Para responder o problema da pesquisa e contemplar o objetivo geral foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- a) Contextualizar a utilização dos fornos siderúrgicos na produção metalúrgica;
- b) Descrever as particularidades dos revestimentos refratários de fornos panelas de aciarias;
- c) Investigar a importância da escória para o desempenho de fornos siderúrgicos e para a qualidade do aço;
- d) Realizar um estudo de caso para analisar a influência da qualidade da

escória no desempenho e vida útil de refratários de um forno panela elétrico de uma grande siderúrgica do interior do estado de São Paulo.

1.3 Justificativa

Justifica-se a abordagem dada para a pesquisa pelo papel fundamental que a escória desempenha na produção de aço, que pode influenciar significativamente não só a sua qualidade, com a performance dos revestimentos refratários dos fornos panelas. A escória é formada durante o processo de refino do metal a partir de matérias-primas como cal calcítico, dolomítico, carbureto de cálcio, entre outros. Ela desempenha várias funções importantes, como na remoção de impurezas; na desoxidação; na isolação térmica; no controle da composição; e na redução de desgaste.

Além disso, durante o processo de fundição do aço, a escória também pode proteger o refratário do forno da corrosão e do desgaste, prolongando sua vida útil. A composição química e a viscosidade da escória têm impacto na penetração e erosão dos refratários, pois, escórias de má qualidade podem causar desgaste abrasivo, erosão e corrosão e, por outro lado, escórias mais fluidas e com basicidades balanceadas podem colaborar para o aumento de vida útil e desempenho dos revestimentos refratários.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fornos siderúrgicos na produção de aço

Esta seção busca trazer uma melhor compreensão sobre o papel e a importância dos fornos siderúrgicos para a efetividade da produção e qualidade do aço. Deste modo, não apenas abordaremos o funcionamento dos fornos, como também, será contextualizado o setor siderúrgico para que se possa mostrar a relevância da eficiência das operações nos fornos para evidenciar sua importância.

Segundo Tâmega (2017), quando a humanidade passa a utilizar os metais, acontece uma grande mudança do ponto de vista de fabricação e funcionalidade dos objetos e utensílios. Quando o processo de produção do ferro, extraído do minério de ferro, começa a se desenvolver através dos processos siderúrgicos modernos ocorre uma revolução que possibilita melhorar a qualidade da liga metálica obtida, e a produtividade. Na siderurgia moderna, os altos-fornos e os conversores são equipamentos fundamentais para a produção do ferro e aço.

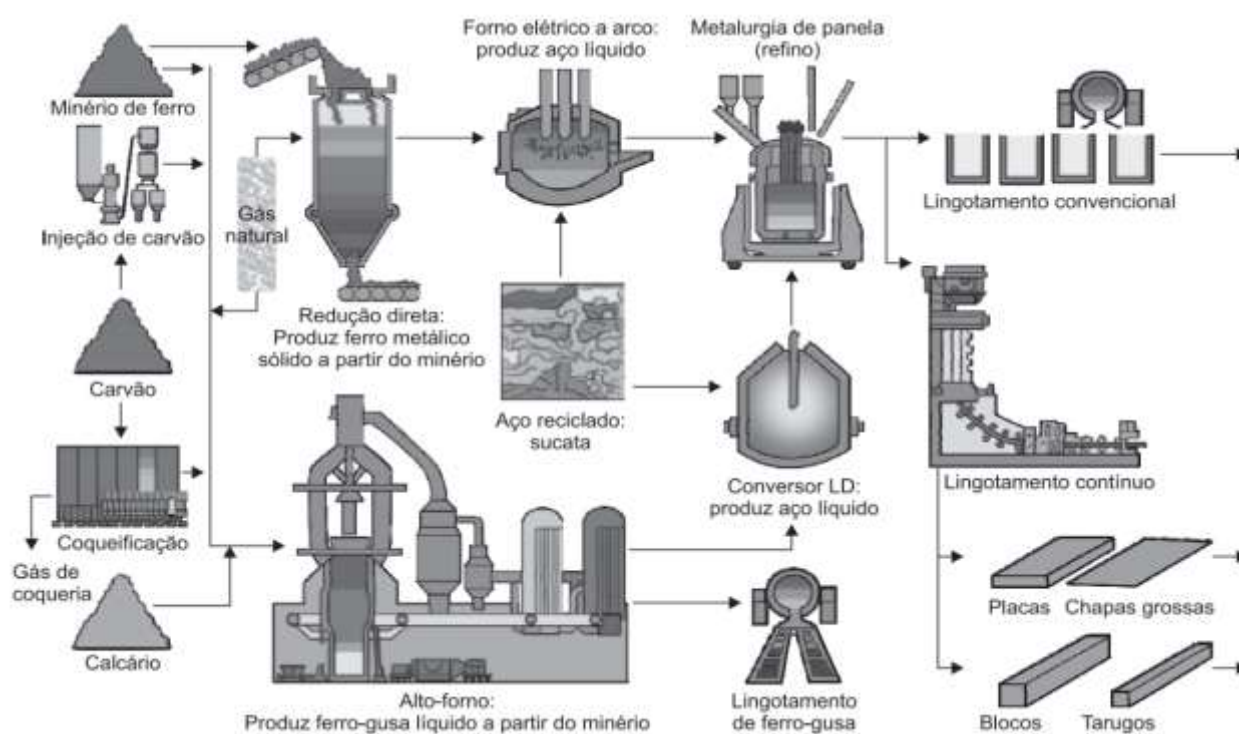
Santos (2015) explica que a produção de materiais metálicos envolve diversas operações, cuja quantidade e complexidade variam conforme o tipo de minério e o metal em questão. A etapa de extração do metal pertence ao campo da Metalurgia Extrativa, enquanto os processos de purificação e aprimoramento são tratados na Metalurgia do Refino. Quando essas duas áreas são consideradas em conjunto, elas compõem o que se conhece como Siderurgia. Já Cardoso (2015) aponta que a siderurgia está majoritariamente relacionada à indústria de transformação, caracterizada por processos físicos, químicos e biológicos aplicados a materiais, substâncias e componentes com o objetivo de gerar produtos novos.

Cardoso (2015, p. 20) destaca que, embora a indústria de transformação esteja principalmente voltada à fabricação de bens materiais, ela também engloba importantes atividades de serviço, como os serviços industriais, a montagem de componentes, a instalação de máquinas e equipamentos, além da manutenção e reparação. Esses serviços são fundamentais para o ciclo produtivo, pois exigem equipamentos, técnicas e habilidades específicas do ambiente industrial, podendo ser realizados tanto em unidades integradas quanto em empresas especializadas.

Complementando essa visão, Santos (2017) descreve que o fluxo produtivo mais usual na siderurgia envolve etapas como o recebimento de matérias-primas

(minério de ferro, carvão e calcário), a redução direta do minério para obtenção do metal — ou, alternativamente, a produção de ferro-gusa em alto-forno —, seguida pela fabricação do aço líquido na aciaria, utilizando fornos elétricos ou conversores. Pode ainda ocorrer um refino secundário no forno panela para ajustar a composição final do aço. Por fim, o processo inclui o lingotamento, etapa em que o aço é solidificado em moldes ou por lingotamento contínuo, preparando-o para os processos mecânicos subsequentes que resultarão nos produtos de aço. Na Figura 1 é apresentado um esquema do principal processo produtivo da indústria siderúrgica.

Figura 1 – Processo de fabricação do aço e ferro no setor siderúrgico



Fonte – Santos (2015)

Cardoso (2015) explica que a diversidade do setor siderúrgico, responsável por fornecer produtos destinados ao consumo básico, intermediário e de bens de capital, se organiza por meio de diferentes segmentos. Esses segmentos incluem a siderurgia e a metalurgia básica; o setor eletroeletrônico; as indústrias aeroespacial e de defesa; o setor naval; os bens de capital mecânico (abrangendo máquinas, equipamentos e máquinas e equipamentos agrícolas); além do setor automotivo, que é subdividido em montadoras e fabricantes de autopeças, e outros materiais voltados ao transporte.

Os produtos da siderurgia destacam-se não apenas pela versatilidade e viabilidade econômica em termos práticos e funcionais, mas também por serem o

material mais reciclado no mundo. O aço pode passar por sucessivos ciclos de reciclagem sem perda de qualidade, tornando-se um exemplo relevante de processo sustentável. Conforme dados do Instituto Aço Brasil, grande parte da água utilizada nas etapas produtivas é reaproveitada continuamente, o que diminui significativamente a necessidade de captação de novas fontes hídricas — sendo apenas uma fração mínima retirada diretamente de rios. Além disso, a indústria siderúrgica conta com sistemas próprios de geração de energia, aproveitando os gases oriundos do processo produtivo para alimentar parte de suas demandas energéticas (Tâmega, 2017).

Conforme Tâmega (2017), os fornos desempenham um papel essencial nos processos produtivos envolvendo metais e suas ligas, já que esses materiais precisam estar no estado líquido para serem trabalhados na manufatura. Existem diferentes formas de classificar esses equipamentos, geralmente baseadas na fonte de energia empregada — que pode ser eletricidade ou combustível — e no tipo de operação, como cadinho, revérbero, cuba, entre outros modelos. De modo geral, os fornos a combustível tendem a ser mais econômicos no processo de aquecimento em comparação aos fornos elétricos.

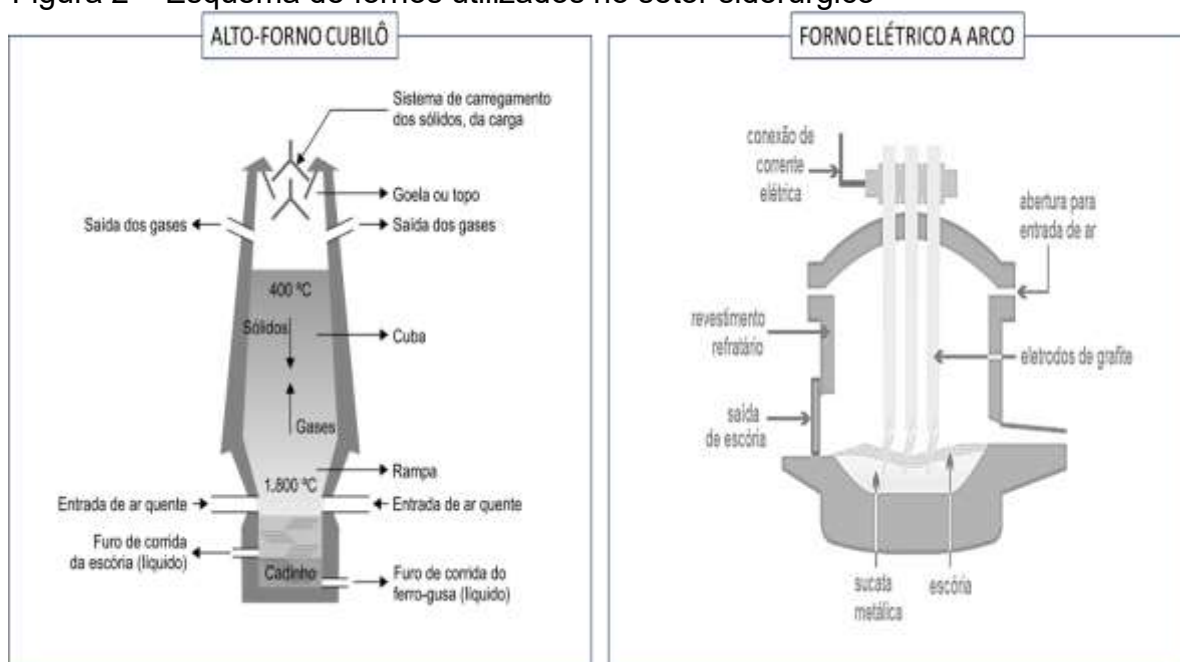
Cerca de 60% do aço produzido mundialmente tem origem no processo de alto-forno, considerado o principal equipamento das operações siderúrgicas. Também conhecido como forno de primeira fusão, é nesse reator que o minério de ferro passa por sua primeira conversão, originando uma liga ferrosa chamada ferro-gusa ou ferro fundido de primeira fusão. O alto-forno, de formato tubular e operação contínua, é projetado especificamente para gerar ferro-gusa, um produto intermediário obtido em estado líquido. Esse material serve tanto como base para a fabricação de aço quanto como insumo nas fundições para a produção de ferro fundido (SANTOS, 2015).

Gasparini (2016) afirma que o principal objetivo das operações de produção e manutenção nos fornos siderúrgicos é garantir a fabricação de ferro-gusa e aço com segurança, ao menor custo possível e atendendo aos requisitos técnicos e especificações do setor. Para alcançar essa meta, avanços importantes foram realizados nos últimos anos, incluindo melhorias na qualidade das matérias-primas, maior controle da qualidade e confiabilidade dos equipamentos e instalações, além de estudos teóricos sobre os mecanismos dos processos produtivos.

Tâmega (2017) complementa que, quando a fonte de energia utilizada é combustível, um exemplo clássico é o forno cubilô, sendo o alto-forno o modelo mais

reconhecido, amplamente empregado nos processos siderúrgicos devido à sua viabilidade econômica. Esse equipamento opera com base no método de contracorrente, em que a carga metálica e o coque descem enquanto os gases sobem. Por outro lado, no forno elétrico, a corrente alternada passa por uma bobina, induzindo corrente elétrica na carga metálica e provocando o aquecimento, fusão e sobreaquecimento por resistência elétrica. Apesar de serem menos econômicos no aquecimento, os fornos elétricos oferecem vantagens como menor emissão de poluentes no ambiente de trabalho, maior facilidade para automação, melhor homogeneidade de composição e temperatura graças à agitação do metal, além de permitir um controle mais preciso da temperatura e da potência aplicada. Na Figura 2 temos esquemas de fornos utilizados no setor siderúrgico, alto-forno cubilô e forno elétrico a arco, sendo forno a combustível e forno com uso de eletricidade.

Figura 2 – Esquema de fornos utilizados no setor siderúrgico



Fonte – Adaptado de Tâmega (2017)

Santos (2015) destaca que os fornos a arco elétrico são amplamente utilizados na indústria siderúrgica devido à sua versatilidade e eficiência na produção de aço. Nesse tipo de forno, o calor necessário para a fusão é gerado por arcos voltaicos formados entre os eletrodos de grafite e o próprio metal a ser fundido. O aço produzido nesses fornos apresenta alto nível de pureza, sendo possível fabricar desde aços para ferramentas até aços especiais para aplicações em construções mecânicas.

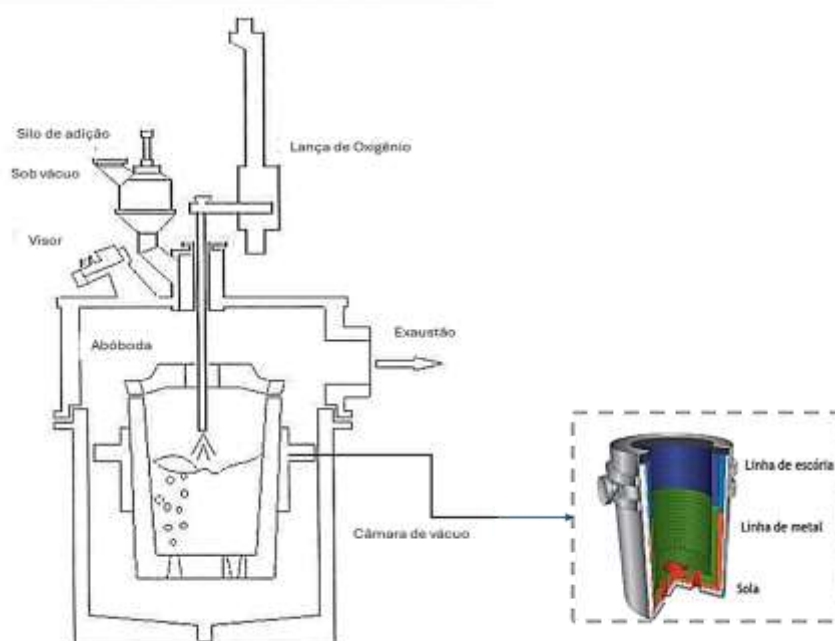
Segundo Cotta e Rodrigues (2014), o alto-forno é considerado o equipamento

principal da siderurgia. Ele opera com um sistema líquido composto essencialmente por ferro e carbono em solução a temperaturas próximas de 1500°C , além da escória que contém os minerais residuais (ganga) do minério e do gás de alto-forno, que é removido por exaustão no topo do equipamento. Para garantir a redução da carga, são necessários equipamentos auxiliares, como regeneradores, turbo sopradores e sistemas de limpeza de gases.

Gasparini (2016) aponta que a operação do alto-forno costuma ser investigada com dois objetivos principais: prever indicadores do processo e compreender os fenômenos que ocorrem internamente. Esses objetivos podem ser alcançados por meio de diferentes abordagens, incluindo estudos em escala industrial, experimentos em escala piloto (laboratorial) ou ainda por modelos matemáticos.

Por fim, Santos (2015) observa que as principais operações siderúrgicas envolvendo fornos incluem a obtenção de aço e ferro-gusa, processos que no alto-forno acontecem através de dois fluxos opostos: o movimento descendente da carga sólida (minério de ferro, coque e calcário) e o movimento ascendente dos gases. Além disso, o forno panela é utilizado especificamente para o refino secundário do aço. A Figura 3 apresenta a representação de um forno panela.

Figura 3 – Estrutura do Forno Panela



Fonte – Santos (2015)

De acordo com Batista, Rocha e Schimitz (2023), o ciclo operacional da panela

de aço inicia com o recebimento do aço vazado dos convertedores (etapa final do refino primário), também chamado de corrida. Durante o vazamento são adicionadas ligas metálicas, desoxidantes, escorificantes e fluidificantes, de acordo com as exigências do aço final a ser fabricado. As principais etapas do ciclo operacional dos fornos são:

- a) preparação as panelas: os fornos têm suas condições refratárias verificadas para realização da adequação dos padrões de troca e eventuais projeções de massa refratária;
- b) recebimento do aço do convertedor: após o vazamento do aço dos convertedores no refino primário eles são direcionados dependendo do tipo de aço e exigência do produto;
- c) refino secundário: as panelas são transportadas aos reatores do refino secundário, onde são feitos os ajustes químicos e de temperatura.
- d) máquina de lingotamento: a panela é enviada à torre de uma das duas máquinas de lingotamento, local no qual o aço líquido será vazado das panelas para as estações de solidificação em formato de placas. Durante este processo de esgotamento da panela, o refratário fica exposto à atmosfera;
- e) basculamento de escória: em seguida, a panela com residual de aço e com a escória remanescente do processo é transportada para o basculamento da escória e posicionada para limpeza e remoção de cascão (aço e escória) via removedor hidráulico. Este processo, embora desempenhado por máquina, depende da operação humana e pode gerar impactos mecânicos para o refratário, tal como trincas e arrancamento de tijolos;
- f) limpeza: a panela é limpa e preparada para uma nova corrida.

O ciclo operacional para a transformação dos aços é apresentado na Figura 4 para uma melhor visualização do processo.

Figura 4 – Ciclo operacional em um forno siderúrgico



Fonte – Santos (2015)

Segundo Belo (2019), a distribuição de carga metálica ou de coque no interior do alto forno é realizada pelos equipamentos que compõem o topo e deve ser realizada de forma radial, utilizando granulometria correta dos materiais a fim de favorecer o escoamento gasoso e assim garantir uma boa permeabilidade. Para que as trocas térmicas e as reações de redução da carga sejam eficientes, é necessário que a distribuição de carga seja realizada de forma correta.

Gasparini (2016) explica que, para garantir uma operação eficiente e estável nos altos-fornos — alcançando máxima produtividade e o menor consumo específico de carbono —, é essencial controlar os parâmetros descritos no Quadro 1. Esse controle depende de dados obtidos por meio de instrumentação e equipamentos de medição, além do apoio proporcionado pelo desenvolvimento de modelos matemáticos.

Quadro 1 – Controle das operações de produção em alto-forno

Parâmetro de Controle	Informações Necessárias	Instrumentação ou Sensor	Modelo Matemático
Nível de carga	Nível de carga contínuo	Sonda automática	Não é necessário
Grau de redução da carga metálica na zona de preparação (fator ômega, consumo de carbono)	Composição e temperatura dos gases do topo; massas e composições químicas da carga	Termopares; analisador da composição dos gases do topo; balanças; instrumentos para análises químicas dos materiais	É necessário
Altura da zona de gotejamento (nível térmico, temperatura do ferro gusa, consumo específico de carbono)	Composição e temperatura dos gases do topo; pesos e composição química da carga; dados do ar soprado; quantidade de injeção; pesos, composições e temperaturas do ferro gusa e da escória	Termopares; analisador da composição dos gases do topo; balanças; instrumentos para análises químicas; medidor de vazão de ar	É necessário
Zona de combustão (penetração e temperatura de chama)	Dados do ar soprado; resistência do coque	Termopar; medidor de vazão de ar; testes de qualidade do coque	Pode ser usado junto com medições
Distribuição de carga	Massas dos materiais; programação da calha rotativa	Balanças; medidores de perfil da carga	É necessário
Distribuição do fluxo gasoso	Distribuição de temperatura dos gases; variações de pressão	Sondas horizontais; termopares; medidores de pressão	Pode ser usado junto com medições
Posição e formato da zona de amolecimento e fusão	Distribuição de temperaturas e gases; dados do ar soprado; pesos e composições químicas da carga	Sondas verticais; termopares; medidor de vazão de ar; analisador dos gases; instrumentações para análises	É necessário
Eficiência de drenagem de líquidos no cadinho	Massas, composições e temperaturas do ferro gusa e escória	Termopares; instrumentações para análises químicas do ferro gusa e escória	É necessário
Permeabilidade do alto-forno	Variações de pressão; dados do ar soprado; dados dos gases do topo	Medidores de pressão; medidor de vazão de ar; termopares; analisador dos gases do topo	Existem modelos, mas pode ser determinado sem eles
Perdas térmicas (desgastes de refratários, formação de casão, desgaste do cadinho, refrigeração)	Variações de pressão; volume e temperatura da água de refrigeração; temperatura dos refratários	Medidores de pressão; termopares	É necessário
Qualidade de carga metálica e do coque	Composição química; propriedades físicas e metalúrgicas	Instrumentações para análises; testes físicos e metalúrgicos	Não é necessário

Fonte – adaptada de Castro (2002, *apud* Gasparini, 2017)

Por fim, constatou-se que os fornos siderúrgicos são peças essenciais na produção de aço e o setor está em constante evolução para tornar esse processo mais eficiente, sustentável e alinhado com as demandas ambientais contemporâneas. Além disso, percebeu-se que os dois tipos principais de fornos siderúrgicos utilizados para a produção de aço são o alto forno e o forno elétrico a arco, ambos têm como variável comum de qualidade o revestimento refratário, próximo assunto abordado.

2.2 – Forno panela: características e funções

Esse tópico tem como objetivo contextualizar o equipamento: explicar o que é o forno panela, suas funções, e por que ele é essencial no processo.

O forno panela é um equipamento fundamental no processo siderúrgico, utilizado principalmente para o refino secundário do aço líquido após sua produção nas unidades primárias, como o conversor LD ou o forno elétrico a arco. Esse forno é projetado para operar como um reator metalúrgico dinâmico, permitindo não apenas ajustes químicos, mas também o controle térmico e a homogeneização do aço antes do seu encaminhamento para a etapa de lingotamento ou vazamento contínuo (SANTOS, 2015).

As operações típicas realizadas no forno panela incluem a dessulfuração, a desoxidação e a remoção de inclusões não metálicas, além de promover ajustes de liga por meio da adição de elementos químicos. Outra função essencial é o controle de temperatura, geralmente realizado por meio de aquecimento elétrico por eletrodos de grafite, garantindo que o aço mantenha a temperatura adequada até o momento da solidificação. Esse conjunto de operações é determinante para assegurar que o aço atenda às especificações técnicas requeridas para diferentes aplicações industriais (GASPARINI, 2016).

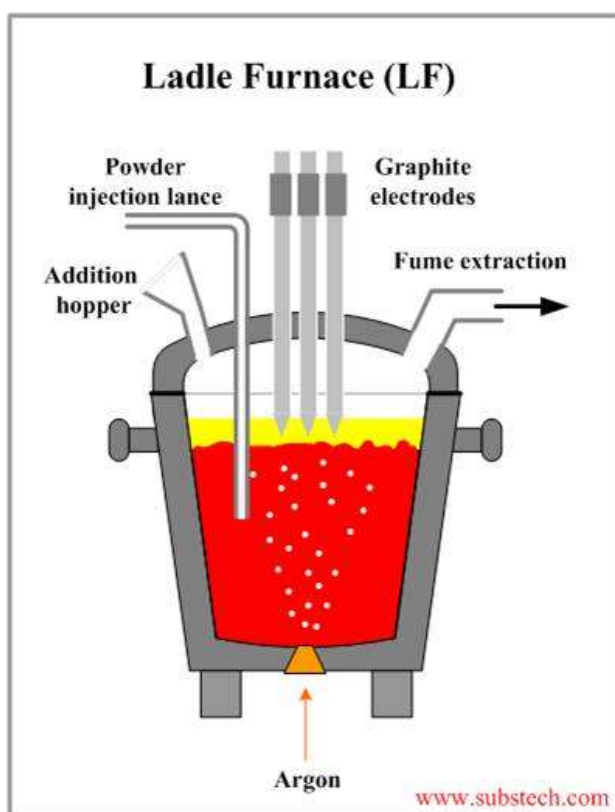
Do ponto de vista operacional, o forno panela também desempenha um papel importante na flexibilização da produção, pois permite correções em lotes já fundidos, reduzindo a necessidade de retrabalhos e minimizando perdas de material. O equipamento é equipado com revestimentos refratários que precisam suportar temperaturas superiores a 1600 °C e resistir à corrosão química provocada pelas escórias e pelo aço líquido. A durabilidade desses revestimentos é diretamente impactada pelas condições operacionais e pela qualidade da escória, tornando

necessário o monitoramento constante para maximizar a vida útil dos refratários (COTTA; RODRIGUES, 2014).

Além de seu papel técnico, o forno panela contribui para ganhos econômicos e de produtividade na aciaria. Ao permitir a realização de ajustes mais precisos e rápidos na composição do aço, ele reduz custos com refugos e aumenta a eficiência do processo produtivo. Em uma perspectiva mais ampla, o forno panela é considerado um elo vital na cadeia de produção do aço de alta qualidade, sendo fundamental em processos que exigem rigorosas especificações técnicas, como na indústria automotiva, naval e aeroespacial (TÂMEGA, 2017).

A figura 5 apresenta a estrutura básica e os principais componentes operacionais de um forno panela elétrico utilizado no refino secundário do aço. O esquema destaca elementos essenciais como os eletrodos de grafite para aquecimento, o sistema de injeção de pós, a adição de elementos de liga e o sistema de extração de fumos. Também é ilustrada a injeção de gás argônio pela base do forno, técnica empregada para promover a homogeneização do banho metálico durante o processo siderúrgico.

Figura 5 - Esquema funcional de um forno panela elétrico (Ladle Furnace – LF)



Fonte: SUBSTECH, s/d.

2.3 Revestimento refratário de fornos e panelas de aciarias

Nesta seção é abordada o revestimento refratário para destacar o papel crucial que ele desempenha em fornos e panelas de aciarias, contribuindo para o desempenho eficiente e a durabilidade desses equipamentos. Deste modo, se investigou não só como o revestimento refratário desempenha na proteção e na performance eficiente de fornos e panelas de aciarias como também, como deve ser realizada a seleção cuidadosa de materiais e práticas para garantir a eficácia a longo prazo desses revestimentos em ambientes metalúrgicos desafiadores.

Como apresentado no Quadro 2, cada tipo de forno usa um tipo de refratário diferente dependendo do tipo de liga metálica que será aquecida.

Quadro 2 – Relação entre tipo de forno, liga e refratário na região do forno

Tipo de forno	Tipo de liga	Tipo de refratário
CADINHO	Alumínio, chumbo, magnésio, zinco	Em contato com metal: ferro fundido, aço, grafite, carbureto de silício; Tampa: silicoso ou aluminoso; Isolamento térmico: silicoso.
	Cobre	Em contato com metal: grafite, carbureto de silício; Tampa: silicoso ou aluminoso; Isolamento térmico: silicoso.
	Ferro Fundido	Em contato com metal: carbureto de silício; Tampa: silicoso ou aluminoso; Isolamento térmico: silicoso.
FORNOS DE INDUÇÃO	Alumínio, zinco, cobres, ferros fundidos	Em contato com metal: carbureto de silício, silicoso, aluminoso; Tampa (quando existente): silicoso ou aluminoso; Canal de corrida: aluminoso; Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
	Aços	Em contato com metal: magnesiano, aluminoso; Tampa (quando existente): silicoso ou aluminoso; Canal de corrida: aluminoso; Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
FORNOS ELÉTRICOS	Não ferrosos e ferrosos fundidos	Em contato com metal: silicoso ou aluminoso; Abóbada: silicoso ou aluminoso; Área dos eletrodos: aluminoso ou magnesiano; Canal de corrida: aluminoso; Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
	Aços	Em contato com metal: magnesiano, cromo-magnesiano, magnésia-carbono, dolomítico; Abóbada: silicoso ou aluminoso; Área dos eletrodos: aluminoso ou magnesiano; Canal de corrida: aluminoso; Isolamento térmico: silicoso ou aluminoso.
FORNO CUBILÔ	Ferros fundidos	Silicoso, neutro ou básico.

Fonte: Adaptado de Baldan e Vieira (2013, *apud* Tâmega, 2017)

Segundo Cotta e Rodrigues (2014), os materiais refratários representam a solução mais adequada para lidar com os desafios associados à manutenção de altas temperaturas nos processos industriais, oferecendo também resistência frente a solicitações químicas e mecânicas. Esses materiais são aplicados entre a superfície metálica do forno (carcaça) e o ambiente corrosivo, composto por metal líquido e

escória, sendo responsáveis por influenciar diretamente a eficiência do aquecimento por convecção.

Destaca Belo (2019), que as principais propriedades e características necessárias para a aplicação dos materiais refratários a condições extremas de processo:

- a) densidade: interfere diretamente em outras propriedades tais como condutividade térmica e resistência mecânica;
- b) porosidade: está relacionada à resistência à corrosão, resistência à penetração de gases, escória e metal líquido, e resistência à erosão;
- c) módulo de elasticidade: relação entre tensão e deformação;
- d) refratariedade: resistência a altas temperaturas;
- e) resistência à abrasão e corrosão: resistência ao atrito com material particulado e contato com fluidos em movimento;
- f) resistência mecânica (compressão e flexão);
- g) resistência mecânica sob carga em elevada temperatura;
- h) resistência a oxidação (refratários com carbono): perda de massa devido reação química com oxigênio: resistência à corrosão por fundentes e escórias: ataque químico durante a etapa de transporte e transformação do aço;
- i) resistência ao choque térmico;
- j) expansão térmica e dilatação térmica reversível;
- k) condutividade térmica: capacidade de retenção de calor durante os processos metalúrgicos.

Gasparini (2016) destaca que a manutenção dos fornos deve priorizar não apenas a eficiência da produção, mas também garantir a segurança operacional e reduzir os impactos ambientais. Para alcançar esses objetivos, são adotadas medidas preventivas, como o monitoramento das emissões gasosas, a realização de serviços de manutenção nos revestimentos refratários e a execução de análises investigativas voltadas ao controle da temperatura interna do forno.

Cotta e Rodrigues (2014) acrescentam que as propriedades e especificações técnicas necessárias para a manutenção dos materiais refratários variam conforme a posição de aplicação ao longo do forno, o tipo de interação com as matérias-primas e os produtos gerados nas reações metalúrgicas dentro do alto-forno. Entre os fatores que influenciam esse desempenho estão as características das matérias-primas, as

interações sólido-sólido, sólido-gás e sólido-líquido, as temperaturas e os gradientes térmicos, a qualidade do ferro-gusa produzido, o volume de escória gerado e os ciclos operacionais relacionados às aberturas para escoamento do ferro gusa e da escória.

Relata Tâmega (2017), que além da composição química da escória, a temperatura de operação do forno está ligada à influência da escória nos refratários. Temperaturas extremas podem levar a reações químicas complexas entre a escória e os refratários, resultando em desgaste e deterioração acelerados. O resfriamento adequado da escória antes do contato com os refratários pode reduzir esse impacto negativo, prolongando a vida útil dos materiais refratários.

Reforça Belo (2019), que o revestimento refratário desempenha um papel crucial em fornos e panelas de aciarias, contribuindo para o desempenho eficiente e a durabilidade desses equipamentos. Aqui estão alguns aspectos relevantes sobre o revestimento refratário nesse contexto:

- a) proteção térmica e estrutural: o revestimento refratário é projetado para suportar altas temperaturas associadas aos processos metalúrgicos nas aciarias. Ele atua como uma barreira térmica, protegendo as paredes internas dos fornos e panelas contra o calor extremo gerado durante a produção de aço;
- b) resistência à corrosão e desgaste: as condições operacionais agressivas nas aciarias envolvem a presença de materiais corrosivos e abrasivos. o revestimento refratário deve resistir a essas condições para garantir uma vida útil mais longa dos equipamentos.
- c) isolamento térmico eficiente: o revestimento refratário contribui para o isolamento térmico, reduzindo as perdas de calor e aumentando a eficiência energética dos processos metalúrgicos.
- d) seleção de Materiais Adequados: diferentes materiais refratários são usados, dependendo das condições específicas de operação. Materiais comumente utilizados incluem tijolos refratários, concretos refratários e fibras cerâmicas;
- e) escolha dos materiais leva em consideração fatores como temperatura de operação, corrosividade do meio, carga térmica e ciclo térmico.
- f) manutenção e reparo: manutenção adequada do revestimento refratário é essencial para garantir o desempenho contínuo do forno ou panela. Isso pode envolver inspeções regulares, reparos de áreas desgastadas e substituição de seções danificadas para evitar falhas prematuras;
- g) inovações tecnológicas: pesquisas e inovações contínuas buscam desenvolver

revestimentos refratários mais avançados, capazes de resistir a condições extremas e prolongar a vida útil dos equipamentos;

- h) impacto ambiental: a preocupação com a sustentabilidade também se estende aos revestimentos refratários. A indústria busca opções mais ecológicas e sustentáveis, incluindo materiais reciclados e processos de fabricação mais limpos.

Conforme relata Dagostini (2024), o desgaste de refratários é a perda do revestimento refratário, por meio da perda de espessura e massa da face de trabalho do material, em consequência do ataque químico por um fluido corrosivo, no qual o refratário e o fluido reagem quimicamente em direção ao equilíbrio químico.

Segundo Tâmega (2017), a seleção criteriosa de materiais, a implementação de práticas de manutenção preventiva e a consideração de inovações tecnológicas são imperativas para assegurar a funcionalidade contínua desses revestimentos em ambientes metalúrgicos desafiadores. À medida que a indústria busca avanços sustentáveis, a atenção à eficiência energética e opções de materiais ecologicamente conscientes também se torna crucial. Deste modo, os autores ressaltam a importância de uma abordagem abrangente e proativa na gestão e manutenção dos revestimentos refratários, fundamentais para o sucesso das operações nas aciarias.

Com esses pressupostos, pode-se entender que o revestimento refratário de fornos e painéis de aciarias destaca a importância crítica desse elemento na eficiência operacional e durabilidade desses equipamentos essenciais para a produção de aço. O revestimento refratário desempenha papéis multifacetados, desde a proteção contra altas temperaturas até a resistência à corrosão e desgaste, contribuindo para a integridade estrutural e o desempenho térmico.

2.4 A importância da escória para o desempenho e vida útil do revestimento refratário em fornos siderúrgicos

Nesta última seção se discute a importância da escória no processo de fabricação do aço, destacando seus vários efeitos no desempenho e vida útil do revestimento refratário em fornos siderúrgicos. Desta maneira, aborda-se os detalhes de como a escória afeta o desempenho e a vida útil dos revestimentos refratários em fornos siderúrgicos, enfatizando a importância de uma gestão bem-sucedida da escória para garantir a integridade e a durabilidade desses componentes essenciais

para a indústria siderúrgica.

De acordo com Costa e Silva (2023), os constituintes mais importantes da escória são o CaO ; SiO_2 ; AlO_3 ; e MgO , e dentre as principais características da escória para os fornos siderúrgicos operem eficientemente, devem ser:

- a) ponto de fusão: a escória deve ser líquida as temperaturas de fabricação do ferro gusa (1459 a 1550°C para altos-fornos operados a coque e 1300 a 1450°C para operação com carvão vegetal;
- b) fluidez: para uma maior facilidade de escoamento e boa transferência de massa, a escória deve ser de baixa viscosidade;
- c) tolerância: pequenas alterações na composição química ou temperaturas não devem causar problemas;
- d) dessulfuração: alta capacidade de remoção de enxofre por parte da escória;
- e) álcalis: a escória deve ter elevada capacidade de remover álcalis;
- f) volume: desde que não haja a interferência em nenhum dos critérios mencionados acima a escória deve ter o menor volume possível, pois, para cada 50 kg de escória por tonelada de gusa, tem-se um consumo adicional de 13,5 kg de coque por tonelada de gusa.

Deste modo, ressalta Dagostini (2024), que a formação de escória é vital para o refino, sendo que os fundentes principais são cal calcítica, cal dolomítica e dolomita crua; que garantem a estabilidade e proteção do refratário durante o sopro. Ao final do sopro, a temperatura e a composição química do aço são verificadas para depois ser vazado pelo furo, deixando os outros componentes para traz devido às diferenças de densidade.

Reforça Costa e Silva (2023), que as escórias são formadas nos processos metalúrgicos com dois objetivos principais: reter os óxidos ou outros compostos indesejáveis presentes nos minérios sujeitos ao refino e reter compostos formados a partir das impurezas que se deseja remover dos metais sendo refinados. Além disso, as escórias de aciaria têm duas funções adicionais extremamente importantes: agir como isolante térmico no topo do reator (forno, conversor, panela, distribuidor); e moderar ou evitar o contato do ar com o metal líquido, limitando a entrada de oxigênio, nitrogênio e hidrogênio (via umidade do ar).

Segundo Batista, Rocha e Schimitz (2023), as reações químicas entre a escória e o material refratário tem como força motriz reduzir a energia livre do sistema à custa da integridade do material refratário, objetivando o alcance de uma composição mais

próxima do equilíbrio entre as fases presentes. Nessa questão eminentemente termodinâmica, a temperatura desempenha fundamental importância na velocidade da definição das composições de equilíbrio entre as fases presentes, sendo que a composição química da escória afeta todo o processo, desde o desempenho do refratário até a qualidade do aço.

Ressalta Gasparini (2016), que além de alterar a participação relativa dos componentes da carga metálica, as características da escória, como a composição química e umidade, pode alterar os parâmetros operacionais e de qualidade. Ou seja, a garantia que a escória terá os requisitos corretos pode levar não só a eficiência do processo aos menores custos, como ajudará a alcançar com efetividade as especificações que garantem a qualidade do aço que está sendo fabricado.

As escórias resultam de uma combinação variada de óxidos, que podem ser adicionados intencionalmente ou formados durante as reações de refino no processo siderúrgico. Entre eles, destacam-se o óxido de cálcio (CaO) e o óxido de magnésio (MgO), presentes em todas as fases da fabricação do aço e conhecidos como escorificantes ou materiais refratários. O CaO tem papel fundamental nas etapas de desfosforação e dessulfuração, enquanto o MgO contribui para ajustar a compatibilidade da escória com os revestimentos refratários dos equipamentos da aciaria. Como ambos possuem altos pontos de fusão (cerca de 2600 °C para CaO e 2800 °C para MgO), é essencial definir uma composição que esteja alinhada às temperaturas do processo. O ponto-chave para obter uma escória eficiente está no equilíbrio entre os óxidos refratários e os óxidos fluxantes, garantindo uma escória compatível com as características dos revestimentos utilizados (PRETORIUS et al., 1999; apud DAGOSTINI, 2024).

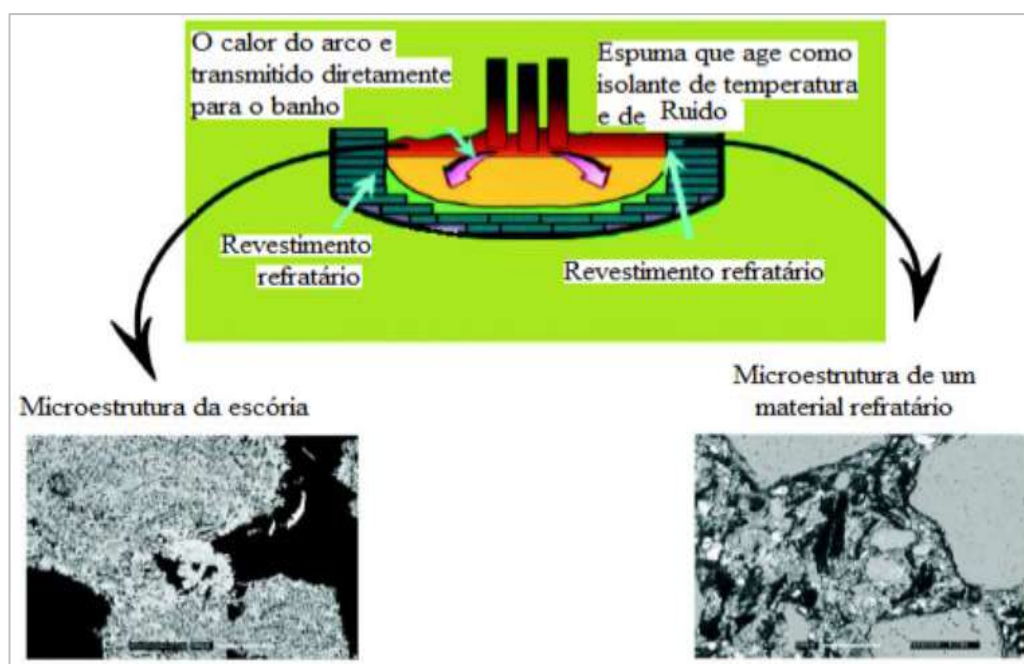
Segundo Santos (2020), visando alcançar a dupla saturação da escória, para a formação de espuma, deve se adicionar cálcio (cal calcítica, de elevada concentração de cálcio) e magnésio (cal dolomítica, contendo cálcio e magnésio), além de ser necessário que haja condições físico-químicas adequadas, geralmente, alta viscosidade, baixa densidade e baixa tensão superficial,

Nesta condição, de acordo com Dagostini (2024), a dupla saturação tem como foco neutralizar a Sílica e evitar que a escória reaja com o MgO presente no tijolo refratário. Esta é uma condição fundamental para um bom desempenho dos refratários, pois, a formação de espuma da dupla saturação reduz a força motriz da reação de corrosão e minimiza o desgaste do refratário, além de colaborar para

que a escória apresente a viscosidade adequada para facilitar o desenvolvimento das reações na interface do metal com a escória e aumentar o ciclo de vida dos eletrodos utilizados.

Reforça Anjos (2010), o uso da escória espumante em fornos siderúrgicos elétricos está se tornando cada vez mais evidente ao longo tempo, sendo que a interação mais importante é a imersão do arco elétrico na espuma que aumenta a eficiência do processo de transferência de calor. A Figura 6 mostra como a abobada e as paredes do forno são protegidas da radiação do arco pelo contraste da escória com espuma.

Figura 6 – Benefícios da escoria espumante



Fonte: Anjos (2010)

Deste modo, conforme relata Anjos (2010), uma das questões que sempre preocuparam engenheiros e cientistas era a criação de um parâmetro universal que pudesse ser aplicado ao setor siderúrgico para aferir escórias de diferentes tipos, até que resolveu-se distinguir as escórias entre doadores ou receptores de íons. O autor ainda reforça que estes diversos tipos de escória têm importantes funções nos processos de aciaria elétrica, dentre estas, destaca-se:

- cobrir o arco para proteger o revestimento refratário da radiação emitida pelo arco elétrico;
- promover a qualidade do aço, absorvendo os produtos de oxidação (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO) e inclusões;

- c) promover uma eficiente desfosforação e dessulfuração do aço;
- d) proteger o metal da oxidação atmosférica;
- e) proteger o aço da absorção de nitrogênio e hidrogênio do ambiente;
- f) minimizar perda de calor, concentrando a energia do arco no banho de aço líquido;
- g) minimizar o consumo do revestimento refratário;
- h) melhorar o rendimento de liga nas práticas de metalurgia da panela.

Portanto, ressalta Batista, Rocha e Schimitz (2023), que um dos principais fatores de desgaste de refratários é a corrosão química, a qual está diretamente relacionada com a qualidade das escórias. Para medir esta qualidade é preciso conhecer o conceito de basicidade da escória (aferida pela relação de (% de massa) de componentes chaves), pois, algumas propriedades físico-químicas importantes para o processo de fabricação do aço, como sua capacidade de dessulfuração, de desfosforação, de carbonetação e a viscosidade estão ligados ao nível de basicidade da escória. O Quadro 3 apresenta como são aferidas a basicidade das escórias no setor industrial.

Quadro 3 – Índices de basicidade usados na prática industrial

Tipo de medição da basicidade	Fórmula
Binária (B2)	$\frac{(\%CaO)}{(\%SiO_2)}$
Ternária (B3)	$\frac{(\%CaO)}{(\%SiO_2) + (\%Al_2O_3)}$
Quaternária (B4)	$\frac{(\%CaO) + (MgO)}{(\%SiO_2) + (\%Al_2O_3)}$

Fonte: Adaptado de Anjos (2010)

Reforça Anjos (2010) que a definição ideal de basicidade (B) para escórias seria parecida com a definição de pH para soluções aquosas. Uma escória ideal pode ser medida pela efetividade da atividade de oxigênio livre que influencia diretamente na performance da escória em garantir a qualidade do aço e a integridade do refratário. Desta forma, para uma performance superior da escória algumas variáveis devem ser controladas, dentre as mais relevantes estão: Teor de FeO; Teor de MgO, basicidade, umidade e temperatura.

Isto, segundo Santos (2020), porque a composição química da escória criada no processo tem o potencial de desgastar o revestimento em várias etapas

do processo. Isso é particularmente verdadeiro quando a basicidade (B) é baixa (entre 1,0 e 1,5) e a oxidação do banho é alta (em cerca de 30% de ferro), o que requer a formação de uma escória com o maior nível de MgO próximo à saturação, o que reduz a dissolução.

Portanto, ressalta Dagostini (2024), que o desempenho das escórias é determinado pela composição química e pela temperatura, o que permite controlar os fatores químicos, físicos e térmicos que ocorrem durante a fabricação do aço. Esses parâmetros podem ser interdependentes, ou seja, quando um deles é afetado, ele também altera o outro, mostrando a necessidade de padronização destes parâmetros, para não afetar o processo pelas variações.

Segundo Costa e Silva (2023), ao misturar diferentes óxidos, ocorre a redução da temperatura *liquidus* da escória, por esta razão, é que se torna possível trabalhar com escórias líquidas em temperaturas de fabricação do aço líquido. Porém nem todos os óxidos apresentam este comportamento. Costuma-se dividir os componentes das escórias em dois grupos distintos:

- a) óxidos refratários: óxidos que, quando adicionados, na escória aumenta a temperatura liquidus da mesma. Ex: CaO e MgO; e
- b) óxidos fluxantes: são óxidos que, quando adicionados, diminuem a temperatura liquidus da mesma. Ex: SiO₂, Al₂O₃, FeO;

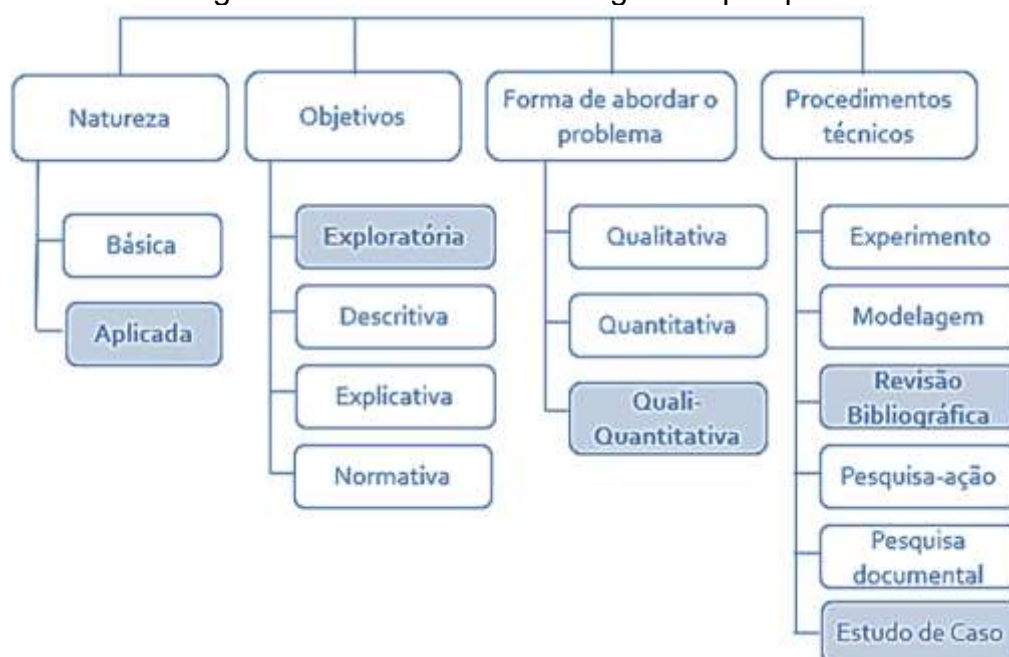
Assim, de acordo com Batista, Rocha e Schimitz (2023), a linha primária de escória no forno elétrico fica em contato direto com o refratário, sendo a área de maior solicitação da panela (corrosão, erosão, choque térmico, entre outras), e, portanto, o que em geral, determina a vida dela. Durante uma pequena parcela de tempo do processo, no lingotamento contínuo, a região da linha do metal fica em contato com a escória, preservando o refratário até o escoamento do aço.

Deste modo, percebe-se que a formação da escória tem diversas funcionalidades no processo de fabricação do aço em uma aciaria elétrica, garantindo a integridade do refratário e que a qualidade especificada do aço possa ser atingida. Assim, a composição química e as propriedades físicas da escória podem ser ajustadas para reduzir os danos aos revestimentos refratários, como erosão e corrosão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa configura-se como um estudo de caso de abordagem qualiquantitativa, com o objetivo de analisar a influência da qualidade da escória no desempenho e na vida útil dos revestimentos refratários de um forno panela elétrico em uma siderúrgica localizada no interior do estado de São Paulo. A pesquisa apresenta natureza aplicada e objetivo descritivo, conforme a estrutura metodológica ilustrada na Figura 7.

Figura 7 – Estrutura metodológica da pesquisa



Fonte: Baseado em Lakatos e Marconi (2021)

A abordagem qualiquantitativa permitiu uma análise diagnóstica dos parâmetros operacionais relacionados à aplicação da escória, avaliando tanto qualitativamente quanto quantitativamente o impacto de diferentes composições sobre os índices de controle que influenciam o desgaste refratário. Segundo Lakatos e Marconi (2021), essa metodologia combina análises empíricas e estatísticas para fundamentar conclusões mais robustas.

O forno panela elétrico em questão integra a linha de produção da aciaria, cuja principal saída são produtos semiacabados, como placas, tarugos e blocos. A Figura 8 apresenta o layout da planta industrial onde o estudo foi realizado.

Figura 8 – Layout da aciaria universo da pesquisa



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O aço é produzido via aciaria elétrica, envolvendo duas etapas: a oxidante, responsável pela fusão da sucata e desfosforação, e a redutora, onde ocorre a dessulfuração e os ajustes finais na composição e temperatura do aço (PARRA FILHO; SANTOS, 2011).

A pesquisa aplicada visa desenvolver soluções práticas e mensuráveis, sendo este o caso ao analisar a efetividade da escória no comportamento dos refratários. O estudo envolveu o monitoramento do desgaste refratário utilizando diferentes formulações de escória durante o refino secundário da aciaria elétrica. Após a realização das campanhas, foi feito o dimensionamento do refratário para comparação entre os ciclos de corridas, determinando qual composição proporcionou menor desgaste.

Para embasar teoricamente a pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente, considerando publicações entre 2010 e 2024, obtidas em repositórios de instituições de ensino superior e bases de dados científicas.

No presente trabalho, o estudo teve como meta otimizar o número de corridas do forno panela, examinando diferentes composições de escória da etapa de refino secundário, com variações nos teores de CaO e MgO. O foco foi identificar, dentre as amostras utilizadas pela empresa, qual formulação apresentava melhor desempenho

na redução do desgaste refratário, mensurado em milímetros por corrida, sempre observando margens de segurança operacionais.

Os refratários analisados na pesquisa são do tipo magnésio-carbono e dolomítico (Mg-C 15 a 20%), contendo periclásio fundido (forma mineral natural do óxido de magnésio (MgO), que devido sua raridade na natureza, é produzido artificialmente por meio da calcinação, feito pelo aquecimento em alta temperatura da magnesita) e grafite de alta pureza, projetados para apresentar alta refratariedade, baixa porosidade e permeabilidade, resistência à corrosão, erosão e oxidação, além de resistência ao choque térmico e à flexão a quente. Essas especificações visam garantir desempenho superior durante a operação, atendendo às exigências técnicas da empresa para manter os padrões de qualidade e minimizar custos produtivos.

Durante o estudo, foram analisadas 12 campanhas consecutivas utilizando as novas formulações de escória, implementadas após a aquisição de um equipamento de análise por raio X (Figura 9), o que permitiu maior agilidade no ajuste dos parâmetros. As Tabelas 1 e 2 apresentam as composições representativas das escórias da etapa redutora. Antes da aquisição desse equipamento, as análises eram realizadas externamente, resultando em atrasos que dificultavam ajustes em tempo hábil entre campanhas.

Figura 9 – Equipamento raio-x para análise de escória e a interfase de dados



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

Tabela 1- Composição (%) e Parâmetros

Elemento/Parâmetro	Valor (%)
CaO	52,86
MgO	7,7
SiO ₂	24,52
Al ₂ O ₃	8,51
MnO	1,85
Cr ₂ O ₃	0,13
P ₂ O ₅	0,15
S	0,11
FeT	3,18
Base 1 (CaO+MgO+SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +P ₂ O ₅)	1,77
Base 2 (CaO/SiO ₂) – Basicidade Binária	2,14
Gotas Aço (%)	0,00
FeO+MnO (%)	2,37
FeO (%)	1,3

Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 2 - Composição (%) e Parâmetros da escória

Elemento/Parâmetro	Valor (%)
CaO	55,01
MgO	7,3
SiO ₂	22,3
Al ₂ O ₃	10,5
MnO	1,0
Cr ₂ O ₃	0,12
P ₂ O ₅	0,1
S	0,1
FeT	1,05
Base 1 (CaO+MgO+SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +P ₂ O ₅)	1,78
Base 2 (CaO/SiO ₂) – Basicidade Binária	2,47
Gotas Aço (%)	0,00
FeO+MnO (%)	2,3
FeO (%)	1,3

Fonte: Os autores, 2025.

- Notas:
 - Base 1 = $(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{P}_2\text{O}_5) \rightarrow$ Basicidade Completa
 - Base 2 = $(\text{CaO} / \text{SiO}_2) \rightarrow$ Basicidade Binária

A composição química dos refratários das placas utilizadas nos processos da aciaria é do tipo básica, o que significa que os óxidos ácidos, bem como o FeO presentes na escória vão atacá-los e corroê-los por ação química, necessitando de uma escória desequilibrada para o lado básico, devendo assim, o quociente entre os óxidos 'básicos' e os 'ácidos' da escória ser maior do que a unidade, a fim de se evitar a erosão dos refratários.

Portanto, durante o estudo de caso pretendeu-se analisar qual das novas composições das escórias analisadas é boa para o processo e não muito agressiva ao refratário a fim de aumentar o número de corridas. Foram analisadas as últimas 12 campanhas que se utilizou a formulação de aditivos/ composição química das amostras de escória relatadas após a aquisição do equipamento de análise através do raio-x, o que permitiu a adequação destas variáveis com um melhor tempo de resposta, já que antes as amostras eram levadas a um laboratório terceirizado e os resultados não tinham um tempo hábil entre o final de uma campanha e início da próxima para certas correções.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Resultados

As amostras de escória para o presente trabalho foram coletadas durante a etapa de refino secundário em fornos painéis com auxílio de uma vara, onde a escória foi resfriada a ar, solidificando grudada a este objeto. Logo após, visando a caracterização química de escória, se utilizou a técnica de fluorescência de raios-X por meio do equipamento para análise de escória já apresentado.

Esta técnica trabalha a partir da irradiação de um feixe de alta energia que excita os raios-x característicos de cada elemento presente na amostra. Os comprimentos de ondas individuais são analisados a partir de um sistema composto de cristais e detectores, nos quais intensidades específicas são acumuladas para cada elemento.

Assim, após esta aferição, as escórias analisadas tiveram as seguintes composições médias referentes a 12 campanhas, conforme apresentado na Tabela 1, que conta além da composição, a basicidade completa (B4) e a binária (B2), calculada pelo próprio programa.

Tabela 3 – Composição das amostras de escória analisadas

Componentes (%)	Amostra 1	Amostra 2
CaO	52,60	55,01
MgO	7,79	7,0
SiO ₂	24,52	22,27
Al ₂ O ₃	9,51	16,50
MnO	1,05	1,00
Cr ₂ O ₃	0,13	0,13
P ₂ O ₅	0,09	0,10
S	3,18	0,40
FeT	1,03	1,03
Gotas de aço	0,00	0,00
FeO	1,32	1,30
FeO + MnO	2,37	2,30
B4	1,77	1,76
B2	2,14	2,47
Base 1 – Completa	94,51	100,98
Base 2 - Binária	2,15	2,47

Fonte: Elaborado pelos autores

Como o objetivo é analisar a influência da escória no desempenho e vida útil

do revestimento refratário de placas de aciarias, há de se relatar que apenas a composição química da escória teve modificações entre faixas mínimas e máximas possíveis para garantir a qualidade do processo e, conseqüentemente, do aço que está sendo manufaturado.

Assim sendo, todas as outras variáveis dos processos se mantiveram as mesmas para conseguirmos julgar, pela análise do índice de desgaste do refratário, quais escórias são boas para o processo e não muito agressivas ao refratário visando aumentar seu ciclo de vida útil em relação as composições antigas de escória.

Com base no projeto refratário atual das placas de aço da aciaria universo desta pesquisa, a espessura dos tijolos utilizados na linha de escória é de aproximadamente 150 mm. Atualmente, uma composição diferente da escória foi utilizada como parâmetro para afastamento das placas de aço para reparo parcial, sendo o número de 75 corridas ou quando os tijolos alcançassem uma espessura residual menor ou igual a 65 mm, que é um valor calculado usando uma margem de segurança (0,10 mm). O reparo total realizado ficou em média 101,33 corridas.

As Tabelas 4 e 5 mostram os dados analíticos realizados baseados nas 12 últimas campanhas utilizando as escórias da amostra 1 e 2 (esponjosas e espumantes) já apresentadas.

Tabela 4 – Dados de desgastes do refratário – Amostra 1 (esponjosas)

Campanha	Espessura Inicial	Espessura Mínima	Número de Corridas	Corridas Programadas	Taxa de desgaste médio do refratário (mm / corrida)	
					Real	Esperado
1	150	65	101	106	0.84	0.81
2	150	65	106	105.35	0.80	0.81
3	150	65	121	105.35	0.70	0.81
4	150	65	118	105.35	0.72	0.81
5	150	65	118	101	0.84	0.81
6	150	65	118	105.35	0.72	0.84
7	150	65	108	95.7	0.84	0.89
8	150	65	112	105.35	0.76	0.81
9	150	65	110	105.35	0.76	0.81
10	150	65	118	105.35	0.72	0.81
11	150	65	116	95.7	0.73	0.89
12	150	65	116	95.7	0.84	0.89
Média			110.92	101.33	0.77	0.84

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Tabela 5 – Dados de desgastes do refratário – Amostra 2 (espumantes)

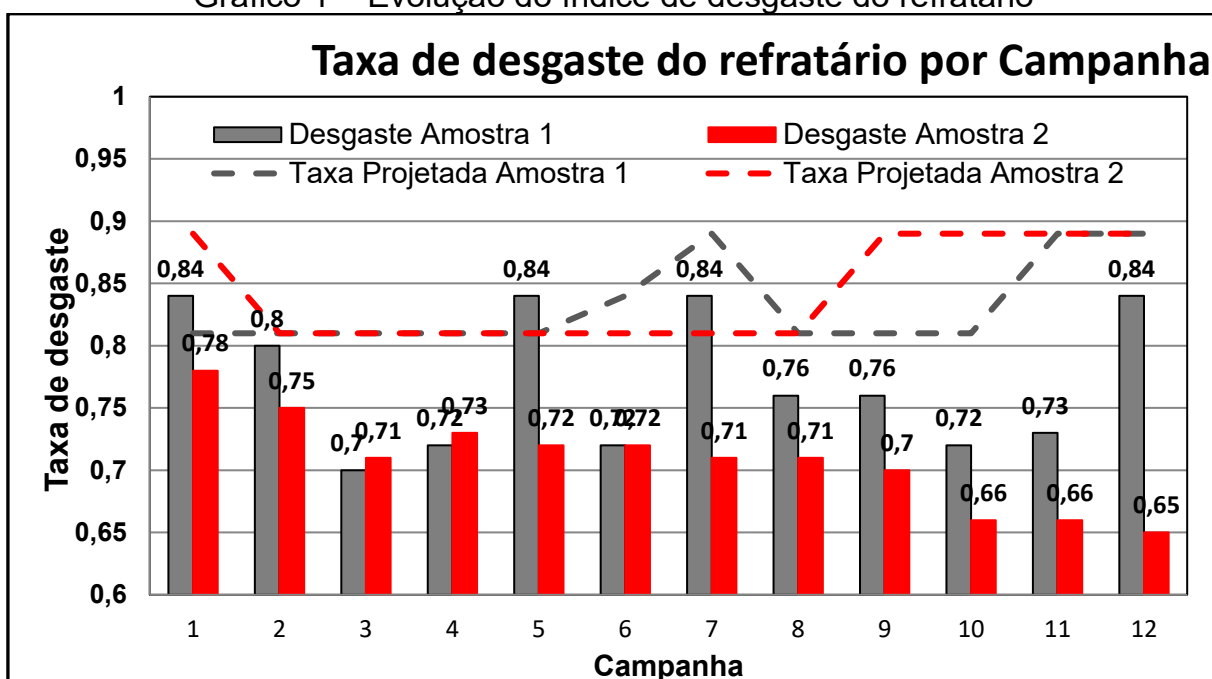
Campanha	Espessura Inicial	Espessura Mínima	Número de Corridas	Corridas Programadas	Taxa de desgaste médio do refratário (mm / corrida)	
					Real	Esperado
1	150	65	109	95.7	0.78	0.89
2	150	65	113	105.35	0.75	0.81
3	150	65	119	105.35	0.71	0.81
4	150	65	117	105.35	0.73	0.81
5	150	65	115	105.35	0.72	0.81
6	150	65	118	105.35	0.72	0.81
7	150	65	119	105.35	0.71	0.81
8	150	65	119	105.35	0.71	0.81
9	150	65	121	95.7	0.70	0.89
10	150	65	129	95.7	0.66	0.89
11	150	65	129	95.7	0.66	0.89
12	150	65	130	95.7	0.65	0.89
Média			116.67	101.33	0.73	0.84

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A previsão de desgaste refratário em milímetros por corrida é usada para ajudar na determinação do número de corridas que uma panela de aço pode processar para maximizar o uso do recurso e garantir a segurança do processo e das pessoas, sendo em parte definida pelo tipo de aço produzido, ligas com carbono extremamente baixos, o valor do desgaste é mais elevado, devido a temperaturas mais altas de trabalho. Assim, com base na espessura inicial dos tijolos refratários, o resíduo do tijolo até o afastamento da panela que é considerado seguro devido às incertezas do processo e à taxa de desgaste médio por corrida pode ser usada para calcular o número de corridas ideal para se operar com segurança.

O Gráfico 1 mostra a evolução do índice de desgaste do refratário, medido através do cálculo da diferença entre a espessura inicial (espessura original do tijolo no início da campanha) e a espessura mínima (menor valor encontrado na região da linha de escória da panela na medição *pós morte* do perfil intermediário) dividido pelo número de corridas (quantidade de corridas executadas até a troca intermediária do refratário).

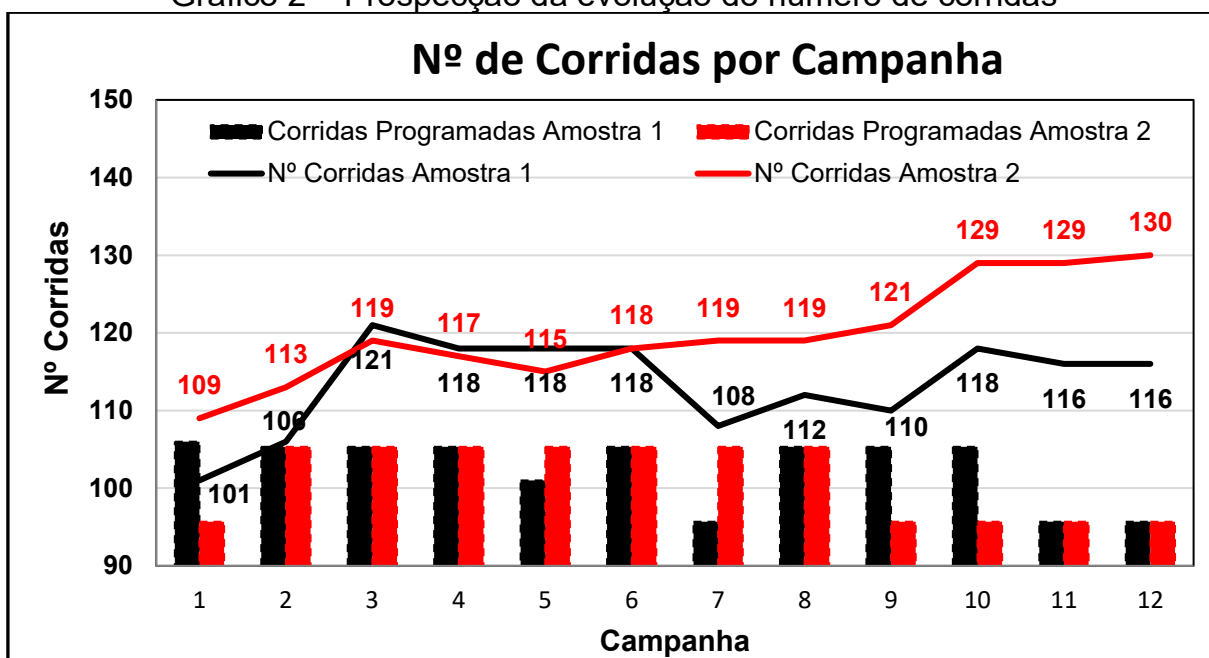
Gráfico 1 – Evolução do índice de desgaste do refratário



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

O Gráfico 2 apresenta a evolução do número de corridas por amostra e comparação com o programado realizado através da diferença entre espessura inicial e mínima residual dividida pela taxa média de desgaste do refratário, já que o reparo intermediário foi realizado como o programado, porém, com dados históricos de campanhas com outros tipos de escória.

Gráfico 2 – Prospecção da evolução do número de corridas



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Com os estudos da escória foi possível verificar a diferença do desgaste das placas conforme demonstrado nas 10 e 11.

Figura 20 - Imagem de uma placa de aciaria com seu revestimento interno exposto, sem nenhuma proteção.



Fonte: Os autores, 2025

Percebe-se claramente a linha de divisão dos refratários, evidenciando com isso o desgaste devido à falta de proteção

Figura 11 - Imagem de uma placa de aciaria com o revestimento protegido, não é possível ver a delimitação entre os tijolos.



Fonte: Os autores, 2025

Portanto, considera-se ser pertinente encontrar um equilíbrio na viscosidade da escória para minimizar esses efeitos adversos. Desta forma, torna-se relevante compreender a composição e as propriedades da escória, bem como a forma como ela interage com o aço líquido, é fundamental para garantir a produção de aço de alta qualidade, com as propriedades desejadas para aplicações específicas.

Com isso, espera-se conseguir não só associar os conceitos de análise de escória crucial para a fabricação de aços presentes na literatura aos resultados apresentados com o estudo de caso realizado, mas também, como a qualidade de uma escória relacionada ao processo metalúrgico e ao desempenho dos refratários.

4.2 Discussão

Antes da análise dos resultados, algumas ponderações qualitativas devem ser mencionadas para complemento, principalmente, quanto as adequações realizadas que elevaram a certas otimização quanto: a absorção de inclusões não-metálicas presentes no aço líquido; minimizaram perdas térmicas às quais o aço líquido está sujeito; e otimização da proteção do banho contra reoxidação e/ou absorção de outros constituintes gasosos; viscosidade e condutividade elétrica adequada; favorecimento da desfosforação do metal líquido; menor consumo dos eletrodos; maior proteção do refratário e uma adequada dessulfuração (apesar de não ideal) do metal líquido em ambiente redutor do forno-painel, apesar de se tratarem de escórias esponjosas.

Como desvantagens apresentadas, tem-se que foi observado um maior gasto energético, pois, visualizou-se a necessidade de mais tempo para espumar a escória devido ao aumento da basicidade binária da escória, o que pode refletir em uma perda de produtividade, apesar do produto acabado sempre atingir as especificações projetadas. Porém, o aumento de número de corridas antes do reparo intermediário pode compensar e reduzir o custo da operação de manutenção de refratários.

Desta forma, pela análise da composição química pós-corridas das escórias das amostras 1 e 2, revelam a formação e a manutenção de uma camada protetora de silicato de cálcio adequada, fator que se mostra muito importante para prolongar a vida útil dos refratários dolomíticos. Com estas escórias também houve uma boa reatividade, bem calcinada, ausente de hidratação, o que pode melhorar o processo de alcance nas especificações do aço.

Relata-se que as análises realizadas corroboram com a literatura revelando que, de acordo com o diagrama CaO-MgO-SiO₂, o aumento da basicidade da escória geralmente leva a uma diminuição da taxa de desgaste dos refratários, pois o teor de CaO presente nas amostras leva a compostos com temperaturas de fusão mais altas. Entretanto, os mecanismos de desgaste de refratários referente a escória podem variar dependendo da basicidade (B₂) e do teor de ferro, que no nível das amostras se mostram ideias para a operação realizada na empresa, ou seja, B₂ entre 2,15 e 2,50, e teor de ferro 1,30 e 1,35 para que se possa ter uma melhor proteção dos refratários das panelas.

Assim, considera-se que as amostras também mostram um tempo adequado de aquecimento, pois, ambas promoveram a captura eficiente de inclusões, mas não a ponto de prejudicar o refratário ou sobreaquecer a escória. Com os dados referentes aos índices de desgaste do refratário, obteve-se uma melhora de 9,10% para a amostra 1 e 15,10% para amostra 2, revelando ser verdadeiro que o aumento da basicidade da escória geralmente leva a uma redução da taxa de desgaste dos refratários. Assim, acredita-se que as duas amostras têm o potencial de aumentar o ciclo de vida útil e desempenho dos refratários.

Por fim, chama-se a atenção que as características das escórias se mostram muito importantes nos processos de metalurgia em fornos panelas elétricas, lembrando que a escória deve ser um subproduto deste processo muito bem controlado a fim de assegurar a eficiência da separação de compostos e na remoção de impurezas indesejáveis que são garantidas pela separação efetiva da escória do metal. Assim, além da composição química e aditivos aqui analisada, é necessário o controle de outras variáveis como ponto de fusão, densidade, viscosidade e tensão superficial.

O estudo permitiu observar que a qualidade da escória influencia diretamente o desempenho e o ciclo de vida útil dos revestimentos refratários por diversos mecanismos, como corrosão química, penetração física, formação de fases interfaciais e interações metal-escória-refratário. Os resultados mostraram que, para maximizar a vida útil e o desempenho dos revestimentos, é necessário controlar a qualidade da escória, sendo a basicidade binária uma das variáveis mais relevantes.

A contextualização sobre a utilização dos fornos siderúrgicos na produção metalúrgica contribuiu para o entendimento da importância desses equipamentos

na obtenção do aço, destacando-se sua função na manufatura do metal em estado líquido e na obtenção de propriedades específicas conforme a aplicação final. Além disso, ao descrever as características dos revestimentos refratários de fornos panela em aciarias, identificou-se que o desgaste desses materiais ocorre gradualmente, tendo como principal causa a corrosão química, podendo ser acelerado por oscilações térmicas e outros fatores operacionais.

O estudo de caso realizado em um forno panela elétrico de uma siderúrgica no interior do estado de São Paulo revelou que os mecanismos químicos de desgaste variam de acordo com a basicidade binária e o teor de ferro, tornando essencial o controle desses parâmetros para otimizar a proteção e o desempenho dos refratários. Observou-se que a basicidade está intrinsecamente relacionada à qualidade da escória, sendo necessário definir faixas-padrão específicas para que ela seja eficiente no processo sem ser excessivamente agressiva ao revestimento.

Como limitação do estudo, destaca-se a impossibilidade de analisar todos os mecanismos de desgaste atuantes, dado que esses parâmetros são padronizados na prática industrial e não puderam ser modificados para investigações mais aprofundadas. Ainda assim, os resultados obtidos em relação à qualidade da escória estão alinhados com o que é descrito na literatura.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa respondeu à pergunta central sobre a influência da qualidade da escória no desempenho e na vida útil dos revestimentos refratários de panelas, mostrando que ela é um fator determinante. Suas funções, como a absorção de inclusões não metálicas presentes no aço líquido, incorporação de elementos indesejáveis, redução de perdas térmicas e proteção do banho contra reoxidação e absorção de gases, são essenciais tanto para aumentar a vida útil dos revestimentos quanto para garantir a eficiência do processo siderúrgico.

Recomenda-se, portanto, uma gestão eficaz do desgaste dos revestimentos refratários, já que isso pode trazer benefícios significativos à produção, à qualidade do aço e à segurança do processo e dos trabalhadores. Otimizar o desempenho dos revestimentos torna-se uma estratégia importante, considerando que o desgaste é inevitável e que o monitoramento e o controle das variáveis envolvidas, especialmente a qualidade da escória, são fundamentais para prolongar a vida útil do material.

Do ponto de vista econômico, constatou-se que uma parcela relevante dos custos operacionais associados aos fornos panela decorre do custo dos materiais, da mão de obra e da disponibilidade das panelas, reforçando a importância de melhorar os parâmetros que influenciam a durabilidade e o desempenho dos revestimentos.

Como sugestão para pesquisas futuras, propõe-se a aplicação de modelos computacionais baseados em modelagem mecânica, termodinâmica e de transporte de massa para simular a interação entre escória e revestimento refratário, visando identificar as condições ideais que maximizem a qualidade da escória e permitam prever o desgaste e a vida útil dos revestimentos em diferentes cenários operacionais.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, F. W. P. Caracterização e otimização da escória de um forno elétrico a arco. 2010. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2010.
- BATISTA, A.S.; ROCHA, M. R.; SCHIMITZ, L. B. S. Predição de desgaste refratário para reparo intermediário da linha de escória de placas de aço em uma aciaria. 2023. 59 p. Produção Científica (Especialização). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Produção. João Monlevade, MG, 2023.
- BELO, E. O. Análise de falhas dos equipamentos de um alto forno. Curitiba. 2019. 71 p. Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CASTRO, W. B. KIMINAMI, C. S. OLIVEIRA, M. F. Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos. São Paulo: Blucher, 2013.
- CARDOSO, A. O. As faces da indústria metalúrgica no Brasil: uma contribuição à luta sindical. Organização: Confederação Nacional dos Metalúrgicos da Central Única dos Trabalhadores. São Paulo: Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos, 2015. 496 p.
- COTTA, T. R.; RODRIGUES, P. F. Materiais refratários em processos siderúrgicos. Belo Horizonte: Editora Técnica, 2014.
- COTTA, L. S. RODRIGUES, C. G. Avaliação de revestimento refratário no processo siderúrgico. E-xacta, v. 7 n. 1, p.185-203. Belo Horizonte: Editora UniBH, 2014.
- DAGOSTINI, V. D. S. Estudo da influência da escória formada no final do vazamento do convertedor na proteção do refratário da placa. 2024. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica). Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória, 2024.
- DINIZ, P. H. A. Análise do consumo energético de forno elétrico a arco voltaico utilizado em indústria metalúrgica nacional. 2018. 76 p. Monografia (Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Campus Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2018.
- GASPARINI, V. N. Desenvolvimento de um modelo de controle de processo para altos-fornos a coque aplicado a altos-fornos industriais. Belo horizonte. 2016. 137 p. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em:

GASPARINI, L. Processos de manutenção e otimização na indústria siderúrgica. São Paulo: Siderurgia Press, 2016.

LOZADA, G. NUNES, K. S. Metodologia científica. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

LAKATOS, E. M. MARCONI, M. A. Fundamentos de metodologia científica. 9ª edição. São Paulo: Atlas, 2022.

SANTOS, G. A. Tecnologia dos materiais metálicos: propriedades, estruturas e processos de obtenção. São Paulo: Érica, 2015.

SANTOS, I. A. S. Influência das propriedades da escória e da partícula de cal na sua dissolução em BOF. 2021.

SANTOS, M. J. Fundamentos da siderurgia moderna. Rio de Janeiro: Editora Metalurgia, 2015.

COSTA E SILVA, A. L. V. Refino dos aços. São Paulo: Blucher, 2023.

SOUZA, Ss. M. O. Gestão da Qualidade e produtividade. Porto Alegre: SAGAH, 2018. 166 p.

SUBSTECH. Ladle Furnace (LF). Disponível em: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ladle_furnace. Acesso em: 7 maio 2025.

TÂMEGA, F. Fundição de processos siderúrgicos. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S. A., 2017. 184 p.

TÂMEGA, R. P. Tecnologia do aço: processos, produtos e aplicações. Porto Alegre: Sul Metalúrgico, 2017.