

**ANÁLISE DAS PERDAS DE
FERRO-GUSA APÓS
DESSULFURAÇÃO E
ESCUMAGEM EM UMA
ACIARIA: CAUSAS
OPERACIONAIS E IMPACTO
ECONÔMICO**

**ANALYSIS OF HOT METAL LOSSES AFTER DESULFURIZATION AND
SKIMMING IN A STEELMAKING PLANT: OPERATIONAL CAUSES AND
ECONOMIC IMPACT**

Ciências Exatas e da Terra · 31/05/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/780094245](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/780094245)

Eliel de Amorim Camilo¹

Silvana de Abreu Martins²

Roberta Gaidzinski³

Neyda de La Caridade Om Tapanes⁴

Maria Iaponeide Fernandes Macêdo⁵

RESUMO

Na produção de aço em aciarias integradas, o controle do teor de enxofre no ferro-gusa é essencial para a qualidade do produto final e para a estabilidade do processo siderúrgico. Este artigo analisa as perdas de ferro-gusa associadas às etapas de dessulfuração e escumagem em uma aciaria integrada, buscando quantificar perdas metálicas, estimar impactos econômicos e identificar causas técnicas e operacionais do problema. A pesquisa foi desenvolvida como estudo quantitativo e descritivo, com revisão bibliográfica, acompanhamento industrial, registro por câmera térmica e análise de dados agrupados por potes de escória. Foram comparadas escumagens de 85% e 100%, considerando perda específica, percentual metálico na escória, indicador RM (associado ao rendimento metálico do processo de dessulfuração/escumagem), número de corridas e estimativa de custo por tonelada de gusa. Os resultados indicaram que a escumagem de 100% tende a apresentar perdas superiores, especialmente quando associada a teores iniciais elevados de enxofre e maior exigência de limpeza do banho metálico. A maior perda específica observada foi de 9,28 kg/t, com estimativa de R\$ 5,50/t de gusa. Conclui-se que a perda de ferro decorre da interação entre teor inicial de enxofre, volume de escória, grau de escumagem, viscosidade da escória e fator humano.

Palavras-chave: dessulfuração; escumagem; ferro-gusa; perda metálica; aciaria.

ABSTRACT

In steel production at integrated steelworks, sulfur control in hot metal is essential to ensure final product quality and process stability. This paper analyzes hot metal losses associated with desulfurization and skimming operations in an integrated steelmaking plant, aiming to quantify metallic losses, estimate

economic impacts, and identify technical and operational causes of the problem. The research was developed as an applied, quantitative, and descriptive case study, including a literature review, industrial process monitoring, thermal camera recording, and analysis of process data grouped by slag pots. Skimming levels of 85% and 100% were compared by considering specific loss, metallic fraction in the slag, the internal RM indicator (hot metal yield indicator associated with the desulfurization and skimming process), number of heats, and estimated cost per ton of hot metal. The results indicated that 100% skimming tends to produce higher losses, especially when associated with higher initial sulfur content and stricter hot metal cleanliness requirements. The highest specific loss observed was 9.28 kg/t, corresponding to an estimated loss of R\$ 5.50 per ton of hot metal. It is concluded that iron loss results from the interaction among initial sulfur content, slag volume, skimming degree, slag viscosity, and human factors.

Keywords: desulfurization; skimming; hot metal; metallic loss; steelmaking.

1. INTRODUÇÃO

A produção de aços com maior limpidez, controle composicional rigoroso e elevado desempenho em serviço exige operações siderúrgicas capazes de reduzir impurezas prejudiciais ao produto final. Entre essas impurezas, o enxofre se destaca por afetar propriedades como ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga e desempenho no lingotamento, especialmente quando presente em teores acima dos limites especificados para determinadas famílias de aço (Costa, 2022; Takano, 1997; Moosavi-Khoonsari; Van Ende; Jung, 2022).

No fluxo de produção de uma usina integrada, parte do enxofre é incorporada ao ferro-gusa a partir das matérias-primas, principalmente por influência do coque empregado no alto-forno. Por essa razão, o ferro-gusa líquido deve ser tratado antes de seguir para o conversor LD, de modo que a composição química do banho seja ajustada às exigências do refino primário e das etapas posteriores de aciaria. A dessulfuração constitui, portanto, uma etapa estratégica, pois reduz o teor de enxofre por meio da injeção de agentes reativos, como cal calcítica, carbureto de cálcio e magnésio, geralmente transportados por gás inerte.

Após a reação dos agentes dessulfurantes com o enxofre, forma-se uma escória que permanece sobre o banho metálico e precisa ser removida por escumagem. Embora essa etapa seja necessária para evitar o retorno do enxofre ao metal e reduzir a transferência de impurezas para o processo subsequente, a remoção da escória também pode arrastar ferro-gusa, seja na forma de gotículas etálicas aprisionadas na escória, seja por retirada direta de metal líquido pela pá de escumagem. Estudos sobre dessulfuração de gusa líquido indicam que a perda de ferro pode representar parcela economicamente relevante do processo, principalmente em operações industriais de grande escala (Magnelöv et al., 2015; Schrama et al., 2020).

O problema investigado neste artigo consiste na quantificação das perdas de ferro-gusa após a dessulfuração e a escumagem, bem como na identificação das variáveis que contribuem para o aumento dessas perdas. O estudo foi motivado pela necessidade de avaliar, com dados reais de processo, se as perdas observadas eram tecnicamente significativas e qual seria o impacto financeiro estimado para a empresa analisada.

Dessa forma, o objetivo deste artigo é analisar quantitativamente as perdas de ferro-gusa associadas à dessulfuração e à escumagem em uma aciaria, identificando suas principais causas operacionais e estimando o custo das perdas por tonelada de gusa. O texto está organizado em cinco seções: após esta introdução, apresenta-se a fundamentação teórica sobre dessulfuração, agentes reativos, escória e perda metálica; em seguida, descreve-se a metodologia empregada; posteriormente, discutem-se os resultados industriais obtidos; por fim, são apresentadas as conclusões e recomendações técnicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Dessulfuração do Ferro-gusa e Efeito do Enxofre

A dessulfuração consiste na redução do teor de enxofre presente no ferro-gusa ou no aço líquido por meio da transferência desse elemento do banho metálico para uma fase escorificada. Em aços convencionais e especiais, o controle do enxofre permanece relevante porque esse elemento pode reduzir ductilidade, tenacidade e resistência à fadiga, além de interferir no lingotamento e na limpidez do aço. Estudos recentes reforçam que a eficiência da dessulfuração depende simultaneamente da composição do ferro-gusa, da natureza dos agentes injetados, da interação metal-escória e das condições de mistura no banho (Costa, 2022; Moosavi-Khoonsari; Van Ende; Jung, 2022; Schrama et al., 2022; Yang et al., 2026).

No pré-tratamento do ferro-gusa, a remoção de enxofre é favorecida por escórias básicas, baixo potencial de oxigênio, adequada fluidez da escória e elevada capacidade de sulfeto. De forma simplificada, a

reação de dessulfuração envolve a transferência do enxofre dissolvido no metal para a escória, na qual se formam sulfetos mais estáveis. A efetividade do processo depende tanto da termodinâmica das reações quanto da cinética de transporte do enxofre até a interface metal-escória (Takano, 1997; Moosavi-Khoonsari, Van Ende, Jung, 2022; Cwudziński; Falkus, Podolska-Loska, 2024).

2.2. Agentes Dessulfurantes e Mecanismos Reacionais

Os agentes dessulfurantes mais empregados no pré-tratamento de gusa incluem cal calcítica, carbureto de cálcio e magnésio. A cal apresenta baixo custo e ampla disponibilidade, mas tende a ser cineticamente menos eficiente quando comparada ao carbureto de cálcio. O carbureto de cálcio, por sua vez, apresenta elevada reatividade com o enxofre, embora exija cuidados de manuseio devido à possibilidade de formação de acetileno em contato com água. O magnésio possui elevada capacidade dessulfurante, mas é altamente reativo e pode contribuir para turbulência no banho devido à vaporização em contato com o ferro-gusa líquido (Gadsdon, Han, 2010; Silva, 2012).

As principais reações associadas ao processo podem ser representadas, de forma simplificada, pela formação de CaS e MgS a partir do enxofre dissolvido no metal. No caso do carbureto de cálcio, a reação pode ser expressa como $\text{CaC}_2 + [\text{S}] \rightarrow \text{CaS} + 2\text{C}$. Para o magnésio, a reação pode ocorrer tanto com magnésio vaporizado quanto dissolvido no banho metálico, formando MgS. A estabilidade desses sulfetos, observada em diagramas termodinâmicos, explica a preferência de elementos como cálcio e magnésio pela formação de

sulfetos em comparação com o ferro (Takano, 1997; Moosavi-Khoonsari, Van Ende, Jung, 2022).

Industrialmente, a injeção dos agentes pode ocorrer por mono-injeção, co-injeção ou multi-injeção. A multi-injeção amplia a flexibilidade operacional, pois permite combinar diferentes agentes conforme o teor inicial de enxofre, a basicidade pretendida, a condição da escória e o tempo de processo. Modelagens cinéticas e fluidodinâmicas recentes indicam que a eficiência da dessulfuração por injeção em panela depende da profundidade da lança, do gás de arraste, da dispersão das partículas, da turbulência e da renovação da interface metal-escória, fatores que também ajudam a explicar variações de rendimento entre corridas industriais (Moosavi-Khoonsari, Van Ende, Jung, 2022; Guo et al., 2024; Cwudziński, Falkus, Podolska-Loska, 2024).

Entre as tecnologias utilizadas no pré-tratamento do ferro-gusa, destaca-se o processo Kanbara, ou reator KR, no qual a remoção de enxofre é intensificada pela agitação mecânica do banho e pela melhor interação entre metal, escória e agentes dessulfurantes. Essa configuração favorece a transferência de massa e pode contribuir para maior eficiência da dessulfuração. Estudos recentes com modelagem tridimensional mostram que a dispersão das partículas dessulfurantes, as condições de injeção, o fluxo de gás e o movimento de agitação influenciam diretamente a taxa de dessulfuração e a eficiência do tratamento do gusa líquido (Jia et al., 2022).

2.3. Escória, Viscosidade e Perda Metálica

A escória de dessulfuração tem papel fundamental no controle químico do processo, mas também está diretamente associada à perda de ferro. As perdas podem ocorrer por aprisionamento de gotículas metálicas na escória, por arraste durante a escumagem ou por efeitos operacionais associados à remoção excessiva da camada escorificada. Pesquisas recentes destacam que a composição e a modificação da escória são decisivas para conciliar elevada capacidade de remoção de enxofre e menor perda metálica durante a escumagem (Schrama et al., 2021a; Marchesi et al., 2023; Chen, Chen, Wang 2025).

A viscosidade da escória é uma variável crítica, pois influencia a capacidade de separação entre metal e escória. Escórias com maior fração sólida tendem a aprisionar mais gotículas metálicas, aumentando a perda de gusa. Por outro lado, o uso de modificadores ou fluxantes adequados pode reduzir a fração sólida e melhorar a separação metal-escória, desde que não comprometa a capacidade de sulfeto nem gere impactos ambientais ou refratários indesejáveis. Estudos de 2023 a 2025 indicam que alternativas sem fluorita, adições contendo Na_2O e Al_2O_3 e ajustes na energia de agitação podem melhorar a eficiência da dessulfuração e reduzir perdas por escumagem (Marchesi et al., 2023; Vuolio et al., 2024; Chen, Chen, Wang, 2025).

A Tabela 1 sintetiza a influência qualitativa de componentes da escória sobre a capacidade de sulfeto, a fração sólida e a viscosidade. Observa-se que o CaO favorece a capacidade de sulfeto, mas também aumenta a fração sólida, o que pode elevar a retenção de ferro. Essa relação explica por que a otimização da escória não deve considerar apenas a remoção de enxofre, mas também o rendimento metálico do processo.

Tabela 1 – Efeito qualitativo de componentes individuais da escória e da temperatura sobre a capacidade de sulfeto (CS), a fração sólida e a viscosidade do líquido

Componente	Capacidade de sulfeto (CS)	Fração sólida	Viscosidade do líquido
CaO	↑↑	↑↑	↓
SiO ₂	↓	↓	↑
Al ₂ O ₃	↓	↓	↓
MgO	0	↑↑	↓
Na ₂ O	↑	↓	↓
K ₂ O	↑	↓	↓
MnO	↑	↓	↓
CaF ₂	↓	↓↓	↓
Temperatura	↑	↓	↓

Fonte: Adaptado de Schrama et al. (2021b).

Em síntese, a literatura recente confirma que a perda de ferro no pré-tratamento do gusa não é consequência de uma única variável. Ela resulta da combinação entre teor inicial de enxofre, quantidade e natureza dos reagentes, composição e viscosidade da escória, energia de agitação, profundidade da lança, tempo de tratamento e estratégia de escumagem. Esse entendimento justifica a abordagem adotada neste estudo, que avalia simultaneamente perda específica, percentual metálico da escória, indicador RM (indicador de rendimento metálico na dessulfuração/escumagem),

grau de escumagem, teor de enxofre e custo estimado por tonelada de gusa (Moosavi-Khoonsari, Van Ende, Jung, 2022; Marchesi et al., 2023; Guo et al., 2024; Cwudziński, Falkus, Podolska-Loska, 2024; Chen, Chen, Wang, 2025; Yang et al., 2026).

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida como estudo de caso aplicado, de natureza quantitativa e descritiva, utilizando dados reais de processo de uma companhia siderúrgica integrada localizada no Brasil. A empresa analisada atua na produção de aços planos e possui capacidade anual da ordem de milhões de toneladas de aço. Por razões de confidencialidade industrial, os valores econômicos foram estimados com base em referências genéricas de mercado, sem exposição de dados comerciais internos.

O procedimento metodológico envolveu quatro etapas principais: revisão bibliográfica sobre dessulfuração, escória e perda de ferro; acompanhamento do processo industrial de dessulfuração e escumagem na estação de tratamento; registro visual do processo por câmera térmica; e análise de dados de processo agrupados por potes de escória. Após a chegada do ferro-gusa à estação de dessulfuração, foi realizada a pesagem da panela para determinação do peso inicial. Em seguida, o gusa foi tratado com injeção de agentes dessulfurantes e gás de arraste, e a escória formada foi removida por escumagem.

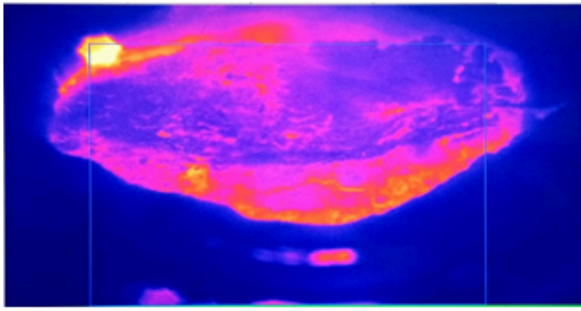
A escumagem foi acompanhada em sala de controle por meio de sistema de imagem, sendo a pá de escumagem operada manualmente por operador treinado. Também foi observado o encaminhamento da escória ao setor de coprodutos, incluindo

separação granulométrica e análise posterior do material. A análise comparou escumagens de 85% e 100%, considerando oito potes de escória e 50 corridas agrupadas, conforme os dados disponíveis nos registros operacionais.

As variáveis avaliadas foram: percentual de escumagem, número de corridas por pote, perda específica em kg/t de gusa, percentual metálico presente na escória, indicador RM, teor de enxofre associado ao processo e estimativa de perda financeira por tonelada de gusa. Neste estudo, o RM foi tratado como indicador de rendimento metálico do processo de dessulfuração/escumagem, interpretado conforme a lógica operacional da empresa, na qual valores menores ou iguais a 1009 são considerados adequados e valores próximos a 1008 são considerados ótimos.

A Figura 1 apresenta registros térmicos do processo de escumagem do ferro-gusa, incluindo o banho antes da escumagem, a escumagem de 85%, o ferro-gusa após a escumagem de 85% e a escumagem de 100%.

Figura 1 – Registros do processo de escumagem do ferro-gusa por imagem térmica



Ferro-gusa antes da escumagem



Escumagem de 85%



Ferro-gusa após escumagem de 85%



Escumagem de 100%

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

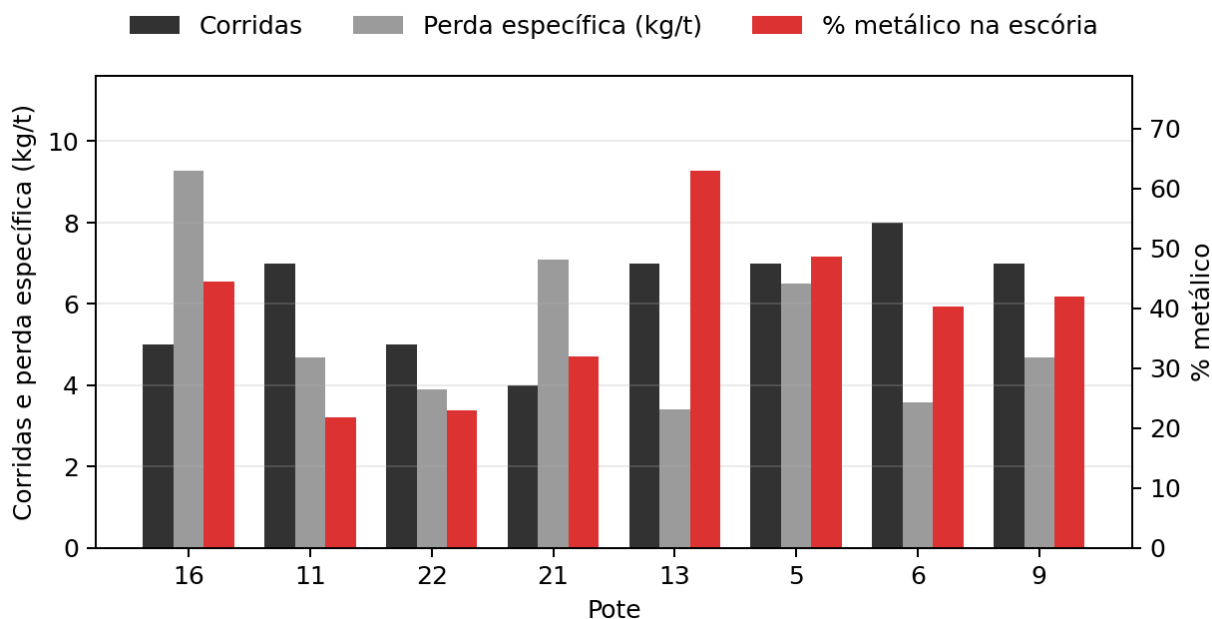
4.1. Relação Entre Escumagem, Percentual Metálico e Perda Específica

A análise dos potes de escória mostrou variação expressiva da perda específica entre os casos avaliados. Conforme a Figura 2, o pote 16 apresentou a maior perda específica, com 9,28 kg/t de gusa, seguido pelos potes 21 e 5, com 7,09 kg/t e 6,49 kg/t, respectivamente. Esses resultados indicam que a perda de ferro não depende apenas da presença de metal na escória, mas também do volume de material escumado, do número de corridas agrupadas, do grau de escumagem e das condições operacionais de remoção.

O percentual metálico na escória variou de 21,68% a 62,96%. O pote 13, por exemplo, apresentou o maior percentual metálico, 62,96%, mas sua perda específica foi de 3,40 kg/t, inferior à observada em

potes com menor percentual metálico. Isso sugere que a análise isolada da fração metálica não é suficiente para avaliar o impacto econômico do processo; é necessário associá-la à massa total de escória removida, à quantidade de corridas e à condição de escumagem. A literatura reforça que as perdas metálicas podem ocorrer tanto por gotículas aprisionadas quanto por arraste direto de metal líquido durante a remoção da escória (Magnelöv et al., 2015; Schrama et al., 2020).

Figura 2 – Correlação entre número de corridas, perda específica e percentual metálico por pote



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

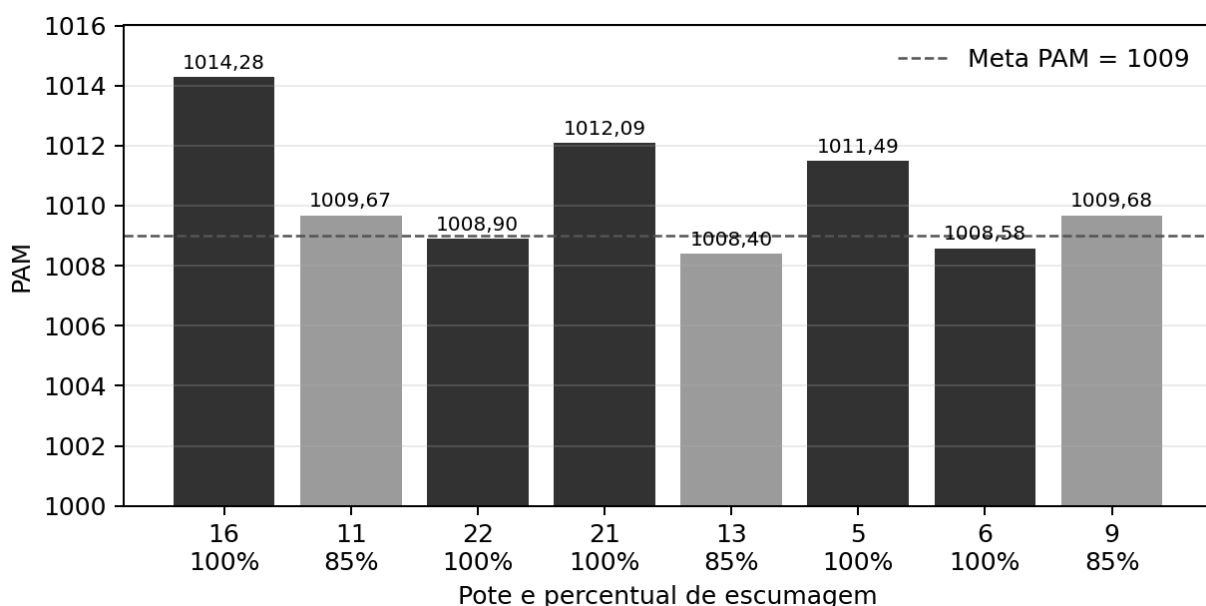
4.2. Desempenho do Indicador RM e Influência da Escumagem

A Figura 3 apresenta o comportamento do indicador RM em função dos potes avaliados e do percentual de escumagem. Observa-se que as escumagens de 100% tendem a apresentar valores mais elevados de RM, o que sinaliza menor rendimento metálico do processo. O pote 16, com escumagem de 100%, apresentou RM de 1014,28, valor significativamente acima da meta interna de 1009. O pote 21,

também associado à escumagem de 100%, apresentou RM de 1012,09. Esses resultados confirmam que a exigência de remoção mais intensa da escória pode aumentar a perda de ferro-gusa.

Entretanto, a comparação entre potes de mesma condição de escumagem revela que o percentual de escumagem não é o único fator determinante. Alguns potes com escumagem de 100% apresentaram RM próximo à meta, como os potes 22 e 6, com 1008,90 e 1008,58, respectivamente. Esse comportamento evidencia a influência conjunta do teor inicial de enxofre, da quantidade de agente dessulfurante, da formação de escória e da operação da pá de escumagem. A necessidade de atingir teores finais mais baixos de enxofre, como aproximadamente 0,001% para alguns aços, aumenta a severidade do tratamento e pode intensificar a geração e a remoção de escória.

Figura 3 – Indicador RM em função do pote e do percentual de escumagem

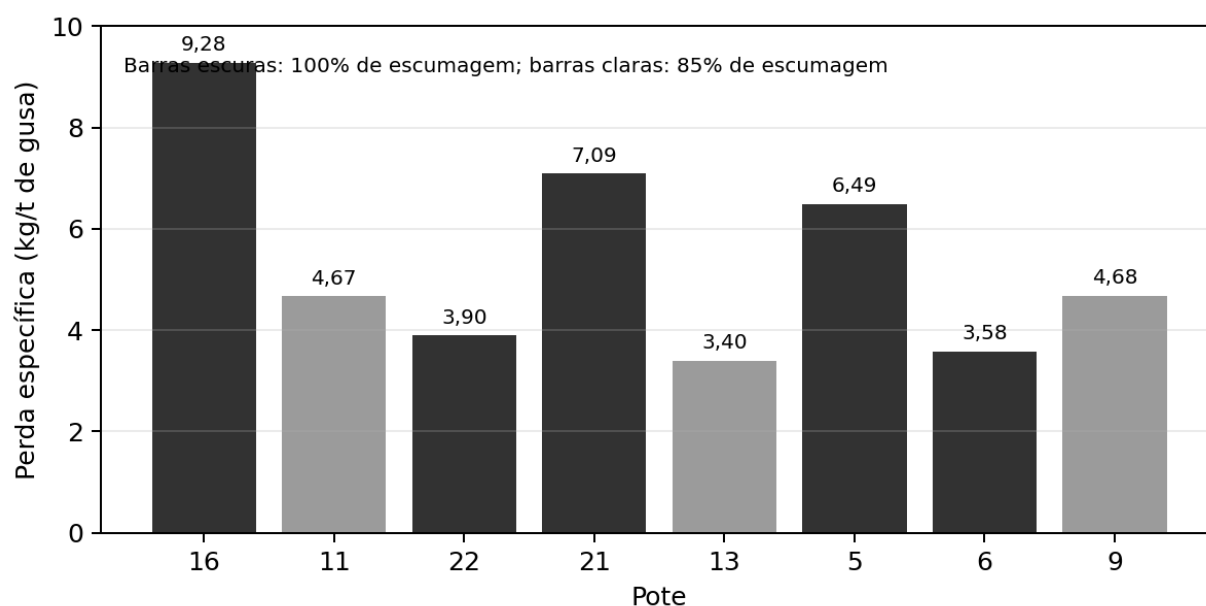


Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

4.3. Estimativa Econômica das Perdas e Causas Predominantes

A Figura 4 e a Tabela 2 apresentam a perda específica por pote e a estimativa de perdas financeiras associadas. Os maiores impactos econômicos foram observados nos potes 16, 21 e 5, com perdas estimadas de R\$ 5,50/t, R\$ 4,21/t e R\$ 3,85/t de gusa, respectivamente. Embora esses valores sejam apresentados por tonelada, seu efeito industrial deve ser interpretado em escala de corrida, uma vez que a capacidade de produção considerada no processo é da ordem de centenas de toneladas por corrida.

Figura 4 – Perda específica de ferro-gusa por pote



Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

Tabela 2 – Perda específica e estimativa econômica por pote

Pote	Escumagem (%)	Corridas	Perda específica (kg/t)	Perda em US\$/t de gusa	Perda em R\$/t de gusa
16	100	5	9,28	1,06	5,50
11	85	7	4,67	0,53	2,77
22	100	5	3,90	0,44	2,31

21

100

4

7,09

0,81

4,21

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/analise-das-perdas-de-ferro-gusa-apos-dessulfuracao-e-escumagem-em-uma-aciaria-causas-operacionais-e-impacto-economico?noblockage>

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023, com valores econômicos genéricos de mercado.

A interpretação dos dados indica duas causas predominantes para o aumento das perdas: o teor inicial de enxofre mais elevado e o fator humano. O teor inicial mais alto de enxofre exige maior consumo de agentes dessulfurantes e pode aumentar a quantidade de escória gerada, elevando a probabilidade de aprisionamento de ferro e de remoção de metal junto à escória. Essa interpretação está em concordância com estudos recentes que relacionam a eficiência da dessulfuração à composição inicial do banho, à cinética de transferência de massa, à quantidade de reagente e às condições de mistura do processo (Moosavi-Khoonsari, Van Ende, Jung, 2022; Vuolio et al., 2024; Cwudziński, Falkus, Podolska-Loska, 2024).

O fator humano foi identificado nos desvios de operação da pá de escumagem. Como o controle da pá depende da atuação manual do operador por meio de joysticks e acompanhamento por tela, pequenas variações de profundidade, tempo de contato e avanço do skimmer podem arrastar parte do ferro-gusa líquido junto à escória. A literatura recente sobre perda de ferro durante a escumagem reforça que a etapa de remoção da escória não deve ser avaliada apenas pela composição química, mas também pela fluidez da escória, pelo tempo de escumagem e pela estabilidade operacional do procedimento (Schrama et al., 2021a; Chen, Chen, Wang, 2025).

Outro aspecto relevante é a reversão de enxofre. Quando o teor final de enxofre é muito baixo, pequenas contaminações provenientes da sucata, da cal ou de etapas posteriores podem elevar novamente o teor de enxofre no banho. Assim, a operação precisa equilibrar a remoção suficiente para atender à especificação do aço e a minimização da escumagem excessiva, que aumenta as perdas de ferro. A comparação entre potes de mesma escumagem, como os potes 5 e 6, sugere que diferenças no teor inicial de enxofre da ordem de 0,03% podem ser significativas para o processo e alterar substancialmente o rendimento metálico.

A atualização bibliográfica de 2022 a 2026 fortalece a interpretação dos resultados industriais obtidos. Os estudos recentes indicam que a redução das perdas metálicas deve combinar controle de escória, otimização da injeção, melhoria da mistura e padronização operacional da escumagem. Assim, os resultados deste trabalho são coerentes com a tendência atual de tratar a dessulfuração não apenas como uma reação química de remoção de enxofre, mas como uma operação integrada de transferência de massa, controle de escória, rendimento metálico e custo operacional (Moosavi-Khoonsari, Van Ende, Jung, 2022; Marchesi et al., 2023; Vuolio et al., 2024; Chen, Chen, Wang, 2025; Yang et al., 2026).

5. CONCLUSÃO

O estudo quantifica e discute as perdas de ferro-gusa associadas às etapas de dessulfuração e escumagem em uma aciaria integrada, demonstrando que a perda metálica resulta da interação entre variáveis químicas, operacionais e econômicas. Os resultados indicam que a escumagem de 100% tende a apresentar perdas maiores do que a escumagem de 85%, sobretudo quando associada

a teores iniciais elevados de enxofre e a especificações finais mais rigorosas.

A maior perda específica observada é de 9,28 kg/t no pote 16, com estimativa de R\$ 5,50/t de gusa. Também se destacam os potes 21 e 5, com perdas estimadas de R\$ 4,21/t e R\$ 3,85/t, respectivamente. Esses valores quando expressados por tonelada, as perdas podem representar impacto econômico relevante em escala industrial, principalmente considerando corridas de grande massa.

As principais causas identificadas são o teor inicial de enxofre mais elevado, que demanda maior adição de agentes dessulfurantes e maior remoção de escória, e o fator humano associado ao controle manual da pá de escumagem. O posicionamento inadequado ou a imersão excessiva do *skimmer* pode arrastar ferro-gusa juntamente com a escória, intensificando a perda metálica.

Como contribuição técnica, o artigo demonstra que a avaliação da perda de ferro não deve se limitar ao percentual metálico presente na escória, mas integrar perda específica, indicador RM, teor inicial e final de enxofre, grau de escumagem, volume de escória e condições de operação. Como recomendações, sugere-se ampliar a base de dados por tipo de aço, correlacionar quantitativamente o teor inicial de enxofre com o consumo de dessulfurantes e padronizar parâmetros operacionais da pá de escumagem, incluindo treinamento, controle de profundidade e monitoramento por imagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEN, Jun; CHEN, Lian; WANG, Lijun. Modification of desulfurization slag for hot metal bearing V-Ti and industry application. Metals,

Basel, v. 15, n. 3, art. 245, 2025. DOI: 10.3390/met15030245.

COSTA, Helton Jackson. Otimização do processo de dessulfuração de gusa em panela através de simulações numéricas computacionais. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

CWUDZIŃSKI, Adam; FALKUS, Jan; PODOLSKA-LOSKA, Angelika. Numerical, physical, and industrial investigations on hot metal desulphurization: from macromixing conditions to reaction rate phenomena. *Materials*, Basel, v. 17, n. 23, art. 5858, 2024. DOI: 10.3390/ma17235858.

GADSDON, B.; HAN, X. Hot metal desulphurization: benefits of magnesium lime co-injection. *Millennium Steel*, Londres, p. 31-36, 2010.

GUO, X.; MAO, C.; WALLA, N.; SILAEN, A.; ZHOU, C. Hot-metal desulfurization using calcium carbide and calcium oxide in transfer ladle: a computational fluid dynamics investigation. *Steel Research International*, Weinheim, v. 95, n. 2, art. 2300246, 2024. DOI: 10.1002/srin.202300246.

JIA, Shuyuan; HE, Zhu; OUYANG, Degang; SUN, Wei; ZHU, Shanhe; WANG, Qiang. Powder injection effect on hot metal desulfurization behavior in the Kanbara Reactor: a transient 3D coupled numerical model. *ISIJ International*, Tokyo, v. 62, n. 3, p. 449-456, 2022. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-331.

MAGNELÖV, M. et al. Iron losses during desulphurisation of hot metal utilising co-injection of Mg and CaC₂ combined with

nepheline syenite. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 42, n. 7, p. 525-532, 2015. DOI: 10.1179/1743281214Y.00000000257.

MARCHESI, Flaviani M.; VIEIRA, Estéfano Aparecido; PAOLA, Jean C. D. de; JUNCA, Eduardo; GRILLO, Felipe Fardin; OLIVEIRA, José Roberto de. Influence of fluorspar replacement in desulfurizing mixtures and variation of process parameters on the hot metal desulfurization efficiency. *REM – International Engineering Journal*, Ouro Preto, v. 76, n. 4, p. 335-343, out./dez. 2023. DOI: 10.1590/0370-44672023760021.

MOOSAVI-KHOONSARI, Elmira; VAN ENDE, Marie-Aline; JUNG, In-Ho. Kinetic simulation of hot metal pretreatment: desulfurization using powder injection. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 53, n. 2, p. 981-998, 2022. DOI: 10.1007/s11663-022-02437-1.

SCHRAMA, Frank N. H. et al. Lowering iron losses during slag removal in hot metal desulphurisation without using fluoride. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 47, n. 5, p. 464-472, 2020. DOI: 10.1080/03019233.2020.1747778.

SCHRAMA, Frank N. H.; BEUNDER, Elisabeth M.; PANDA, Sourav K. Optimal hot metal desulphurisation slag considering iron loss and sulphur removal capacity part I: fundamentals. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 48, n. 1, p. 1-13, 2021a. DOI: 10.1080/03019233.2021.1882647.

SCHRAMA, Frank N. H.; BEUNDER, Elisabeth M.; PANDA, Sourav K.; VISSER, Hessel-Jan; MOOSAVI-KHOONSARI, Elmira; HUNT, Adam; SIETSMA, Jilt; BOOM, Rob; YANG, Yongxiang. Optimal hot metal desulphurisation slag considering iron loss and sulphur removal

capacity part II: evaluation. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 48, n. 1, p. 14-24, 2021b. DOI: 10.1080/03019233.2021.1882648.

SCHRAMA, Frank N. H.; BEUNDER, Elisabeth M.; EMAMI, Ali; BARNES, Chris M.; VAN BOGGELEN, Johan W. K.; SIETSMA, Jilt; BOOM, Rob; YANG, Yongxiang. Desulfurization of high-sulfur HIsarna hot metal. *Steel Research International*, v. 93, n. 8, art. 2100398, 2022. DOI: 10.1002/srin.202100398.

SILVA, **Marcos Antonio da**. Avaliação da utilização de agentes dessulfurantes à base de carbureto de cálcio contendo sodalita em substituição à fluorita em carro torpedo. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

TAKANO, C. Termodinâmica e cinética no processo de dessulfuração de ferro e aço. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE DESSULFURAÇÃO E CONTROLE DE INCLUSÕES DA ABM, 1997, Volta Redonda. Anais do Congresso, São Paulo: ABM, 1997.

VUOLIO, Tero; VISURI, Ville-Valtteri; TÄHTILÄ, Henna; PEKURI, Pauli; FABRITIUS, Timo. The synergistic effect of Na_2O on hot metal desulfurization kinetics in $\text{CaO-Na}_2\text{O-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ slag system. *Chemical Engineering Science*, v. 284, art. 119525, 2024. DOI: 10.1016/j.ces.2023.119525.

YANG, Xiaodong; LIU, Jianhua; LIU, Zhao; CHEN, Lian; ZHOU, Zunchuan; ZHOU, Yu. Research progress on desulfurization technology in hot metal pretreatment. *Iron and Steel*, v. 61, n. 1, p. 1-13, 2026. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20250485.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro pelo apoio financeiro concedido e à Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) pela infraestrutura e suporte institucional disponibilizado para a realização deste trabalho.

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1855-4095>

² Doutora em Engenharia Mecânica (Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ). Professora Associada da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3974-5283>

³ Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ). Professora Associada da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. E-mail [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Doutora em Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Professora Associada da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. E-mail [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9818-3655>

⁵ Doutora em Físico-Química de Materiais pela Universidade Estadual de Campinas- UNICAMP. Professora Associada da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7928-8040>