

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA PRODUÇÃO DE AÇO COM BAIXO TEOR DE ENXOFRE NA VIDA REFRAATÁRIA DAS PANEIS DE AÇO*

Ronaldo Adriano Alvarenga Borges¹
Guilherme Frederico Bernardo Lenz e Silva²

Resumo

A produção de aço com baixo teor de enxofre é de extrema importância para a indústria naval e de tubos para a indústria de petróleo. Porém, a fabricação destes aços acarreta um maior desgaste do revestimento refratário das painéis de transporte/tratamento de aço das aciarias devido às condições operacionais mais severas (maiores tempos de processo, maiores temperaturas, adições de fluxantes de escória, etc.) exigidas durante o processamento destes aços. Neste trabalho é apresentado o modelamento estatístico do impacto da fabricação deste tipo de aço, via rota de tratamento metalúrgico de dessulfuração de aço, na campanha refrataria (vida) das painéis conjuntamente com a análise *post-mortem* de tijolos refratários da linha de escória de uma das painéis. O modelamento levou em consideração os dados de 6 meses de operação da aciaria de uma usina integrada com capacidade de 4,5 Mt/ano. A análise dos resultados revelou que os altos tempos de tratamento no refino secundário, especialmente utilizando o forno painela como equipamento de dessulfuração, a adição de compostos fluxantes de escórias contendo sódio, como nefelina, são os principais fatores que degradam a vida do refratário de tais painéis.

Palavras-chave: Refratários; Dessulfuração de aço; Desgaste de painela; Nefelina.

EVALUATION OF STEEL PRODUCTION IMPACT WITH LOW SULPHUR LEVELS IN THE LIFE OF REFRACTORY OF LADLE STEEL TRANSPORT

Abstract

Steel production with low sulfur content is extremely important for naval and industrial pipes to petroleum industry. However, the manufacture of these steels leads to increased wear of the refractory lining of steel ladle transport of the steelmaking because of the more severe operating conditions (increased process time, temperature, slag fluidizing additions, etc.) required during processing of such steels. This paper presents the statistical modeling of the impact of manufacturing this type of steel, via metallurgical treatment route of steel desulfurization in refractory campaign (life) of the ladles together with the *post-mortem* analysis of refractory bricks (slag line) of one this pots. The modeling took into account data from 6 months of operation of an integrated steelmaking plant with capacity of 4.5 Mt / year. The results revealed that the high treatment times in the secondary refining, especially using the ladle furnace as desulphurization equipment, the addition of compounds containing sodium, such as nepheline, are the main factors that degrade the life of the refractory such ladles.

Keywords: Refractories; Steelmaking desulfurization; Ladle's wear; Nepheline.

¹ Engenharia Metalúrgica, Engenheiro, Mestrando, Departamento de Metalurgia e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

² Engenharia Metalúrgica, Engenheiro, Professor Doutor, Departamento de Metalurgia e Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos tipos de materiais utilizados na indústria siderúrgica podemos destacar os materiais refratários, sendo estes muito utilizados como revestimento de equipamentos e vasos de transporte de gusa e aço nas aciarias de todo mundo. Aproximadamente 70% do consumo de materiais refratários vêm da indústria siderúrgica, o que na prática revela a importância destes materiais na composição de custos e na garantia de segurança operacional das usinas siderúrgicas [1]. Além disso, as frequentes paradas para manutenção de refratários interrompem as atividades operacionais concorrendo indiretamente para elevar os custos de produção do aço [1]. O uso intensivo de refratários nas usinas siderúrgicas é devido às propriedades que estes compostos apresentam como: elevada temperatura de início de fusão, resistência estrutural em altas temperaturas e em ambientes altamente corrosivos, estabilidade diante de variações térmicas intensivas, etc. Os gastos relativos ao consumo de refratários nos processos siderúrgicos representam uma parcela considerável dos custos de produção [2]. Estima-se que o consumo médio de refratários nos últimos anos no Brasil foi de 13,6 kg/t de aço, sendo que as aciarias consomem algo entre 5 e 15 kg/t, na sua maior parte nas painéis de transporte/tratamento do aço [2, 3, 4, 5].

Os principais mecanismos de desgaste de refratários seriam a corrosão química, hidratação, infiltração por aço e escória, erosão mecânica, desgaste e impacto mecânico, tensões termomecânicas, fadiga termomecânica [6]. Já os principais fatores que podem propiciar os mecanismos acima seriam o procedimento de pré-aquecimento, condições de injeção de gases, radiação de arco elétrico, práticas de manutenção de refratários, tempos de operação, temperatura de operação, design dos vasos, injeção de cálcio silício e processos de dessulfuração [6].

Este trabalho visa identificar o impacto que a fabricação de aço com baixo teor de enxofre (aços dessulfurados via rota/tratamento metalúrgico “Dessulfurado”) traz para a vida do refratário das painéis de transporte de aço de uma aciaria.

O processo de desgaste de refratários tem como principal fator à corrosão química e, em alguns casos, é fortemente acelerado devido a danos em consequência das oscilações térmicas [1]. A corrosão química seria o processo inicial de degradação refratária sendo potencializada por posteriores tensões térmicas e mecânicas [7].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir dos dados dos sistemas de informações de produção (banco de dados operacionais), foram levantados os dados relativos à vida (campanha) das painéis, corrida a corrida, e variáveis operacionais como rota de tratamento metalúrgico de dessulfuração. O banco de dados foi relativo a seis meses de processo, compreendendo o período de 01/01/2014 a 30/06/2014. Este banco foi construído levando em consideração os dados de cada corrida processada nas painéis com o seu respectivo histórico das variáveis operacionais como, tempos de tratamento, tipo de aço, rota de tratamento, adições químicas, etc. Este período foi escolhido visando contemplar uma grande massa de dados (aproximadamente 6.700 corridas analisadas contemplando praticamente os dados de todas as painéis em operação deste período). Estes dados foram avaliados de forma a se remover erros como dados duplicados ou corridas com informações incompletas durante as campanhas. A partir daí foi analisado a influência da fabricação deste tipo de aço na vida das painéis através de correlações entre vida da painela e este tipo de tratamento

metalúrgico via modelamento e regressão estatística. Em paralelo ao estudo estatístico, foram coletadas amostras de refratário de uma das painéis de aço em operação após o final de sua campanha (amostras da linha de escória da panela), sendo preparadas e analisadas empregando microscopia óptica e eletrônica para realização da análise de *post-mortem*.

Neste trabalho foi possível identificar e inferir sobre alguns dos fenômenos e os possíveis mecanismos de desgaste que contribuem de maneira significativa no desempenho em termos de vida do refratário das painéis. A Tabela 1 ilustra as principais características da composição do refratário das painéis de aço.

Tabela 1. Estrutura refratária das painéis de aço de acordo com as especificações técnicas

Linha de Escória		Linha de Metal		Fundo		Fundo (região de impacto do jato)	
Composto	(%)	Composto	(%)	Composto	(%)	Composto	(%)
MgO	85 a 90	MgO	75 a 80	Al ₂ O ₃	~ 79	Al ₂ O ₃	~ 88
C	11 a 13	Al ₂ O ₃	20 a 25	MgO	~ 6	C	~ 6
		C	5 a 8	C+ Outros	~ 15	MgO	~ 6

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise da correlação entre a vida das painéis e a rota/tratamento metalúrgico que envolve a fabricação de aços com baixos teores de enxofre (enxofre < 0,006% e rota metalúrgica “Dessulfurado”) foi realizado o agrupamento das rotas analisadas no período. Os 61 tipos possíveis de rotas metalúrgicas foram agrupados em 10 grupos, sendo o grupo Dessulfurado a rota de estudo em questão (Tabela 2).

Tabela 2. Grupos das rotas de tratamento metalúrgico analisados

Grupo	Descrição da Rota	Siglas	Corridas	%
1	Ajuste de composição química sem cálcio silício	AJ CQ Sem CaSi	1680	26,3
2	Ajuste de composição química com cálcio silício	AJ CQ Com CaSi	217	3,4
3	Borbulhamento de argônio sem cálcio silício	Borb Arg Sem CaSi	3013	47,1
4	Borbulhamento de argônio com cálcio silício	Borb Arg Com CaSi	65	1,0
5	Rota cálcio silício	CaSi	90	1,4
6	Dessulfurado	Dessulfurado	368	5,8
7	Descarburado	Descarburado	126	2,0
8	Desidrogenizado + Globulização	Desidrogenizado + Globulização	792	12,4
9	Globulização com cálcio silício	Globulização CaSi	4	0,1
10	Injeção de fio	Injeção de fio	43	0,7
Total			6398	100

A influência da participação percentual da rota dessulfurado na vida (campanha) das panelas pode ser vista na Figura 1. Esta rota engloba a sequência metalúrgica onde o aço é fabricado no conversor passando em seguida por refino no forno panela sendo posteriormente lingotada na máquina de lingotamento contínuo. O que distingue esta rota das demais é a necessidade de dessulfuração do aço no forno panela (para níveis extremamente baixos de enxofre menores que 0,006%) onde o revestimento refratário fica mais exposto ao arco elétrico, a tempos de processo de refino elevados e a adições de fluxantes de escória como a nefelina (composto altamente corrosivo e de alta capacidade de degradação refratária das panelas). Os resultados mostram que o aumento da participação % de corridas cuja rota seja a de dessulfuração (rota Dessulfurado) em relação ao total de corridas durante a campanha da panela reduz a vida das panelas. Além disso, quando se faz a análise dos dados do bloco 1 (Figura 1) com os dados do bloco 2 (onde a referência é a mediana dos dados) verifica-se que houve um aumento de 16% na vida média das panelas com uma respectiva queda de 32% de participação média da rota de dessulfuração na campanha das panelas. Já a comparação do melhor desempenho (175 corridas com 5% de participação da rota dessulfurado) com o pior (92 corridas com participação de 11% da rota dessulfurado) revela uma diferença ainda maior (redução de 47% na vida média da panela).

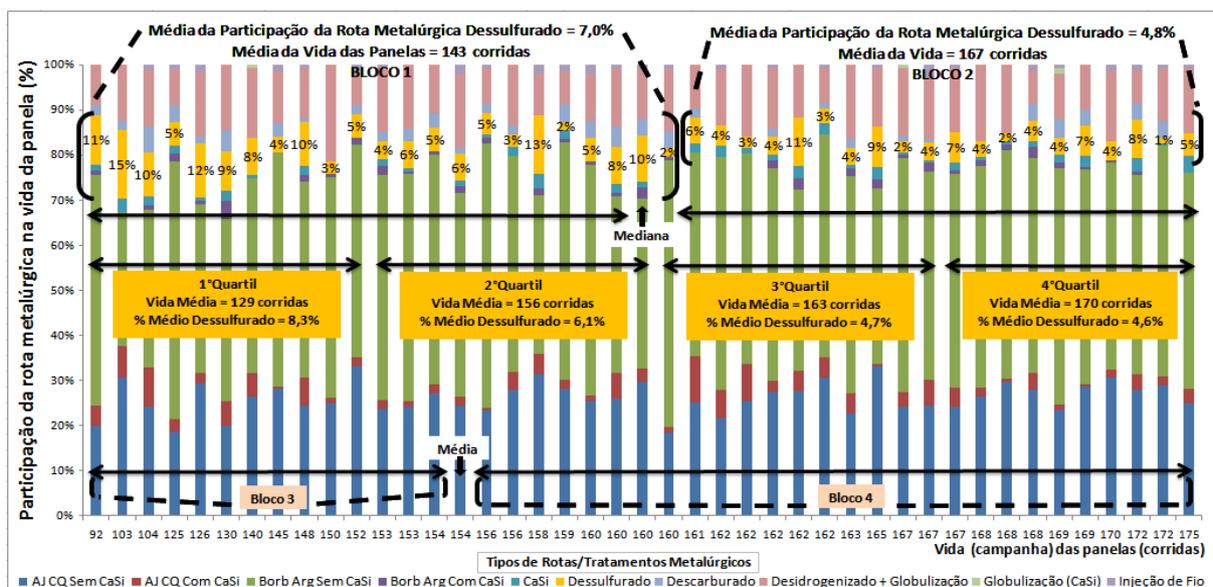


Figura 1. Influência da participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Dessulfurado na vida das panelas.

Quando se considera a vida média das panelas (154 corridas) verifica-se que existe um aumento de 21,5% na expectativa de vida das panelas quando é comparado a vida média das panelas do bloco 3 (135 corridas) em relação ao bloco 4 (164 corridas) para uma redução de 31,9% no percentual de redução da participação da rota dessulfurado do bloco 3 (7,5%) em relação ao bloco 4 (5,1%). A análise por quartis revela, a princípio, uma redução da vida com aumento da porcentagem de rota dessulfurado entre todos os quartis. Porém, realizando uma análise de variância entre os quartis (teste F, sendo que para rejeição da hipótese nula de que as médias são iguais o F observado deve ser maior que F crítico ou a razão F observado / F crítico maior que 1) existe somente uma real queda da vida entre os quartis 3 em relação a 1 e, entre o quartil 4 em relação ao 1. As demais análises de variâncias (ANOVA) são indicadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para as comparações da vida média das painéis

Razão: (F_observado / F_crítico)	Vida_1° Quartil	Vida_2° Quartil	Vida_3° Quartil	Vida_4° Quartil	Vida_ Bloco 2	Vida_ Bloco 4
Vida_1°Quartil	1	4,419	6,699	8,635	NR	NR
Vida_2°Quartil	-	1	7,497	28,497	NR	NR
Vida_3°Quartil	-	-	1	9,585	NR	NR
Vida_4°Quartil	-	-	-	1	NR	NR
Vida_Bloco 1	NR	NR	NR	NR	6,699	NR
Vida_Bloco 3	NR	NR	NR	NR	NR	9,111

Símbolo (-) mesmo valor quando $a_{ij} = a_{ji}$, sendo a_{ij} o elemento da linha i e coluna j . Símbolo (NR) Não Realizado.

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para as comparações do % de rota Dessulfurado (%DS)

Razão: (F_observado / F_crítico)	% DS_ 1°Quartil	% DS_ 2°Quartil	% DS_ 3°Quartil	% DS_ 4°Quartil	% DS_ Bloco 2	% DS_ Bloco 4
% DS_1°Quartil	1	0,498	1,471	1,691	NR	NR
% DS_2°Quartil	-	1	0,265	0,355	NR	NR
% DS_3°Quartil	-	-	1	0,004	NR	NR
% DS_4°Quartil	-	-	-	1	NR	NR
% DS_Bloco 1	NR	NR	NR	NR	1,239	NR
% DS_Bloco 3	NR	NR	NR	NR	NR	1,353

Símbolo (-) mesmo valor quando $a_{ij} = a_{ji}$, sendo a_{ij} o elemento da linha i e coluna j . Símbolo (NR) Não Realizado.

A análise individual desta rota (dessulfurado) revela de maneira clara uma correlação negativa entre vida da panela e aumento da participação das corridas com rota dessulfurada na campanha refratária. A Figura 2 mostra o resultado da correlação estatística da vida versus participação desta rota na campanha.

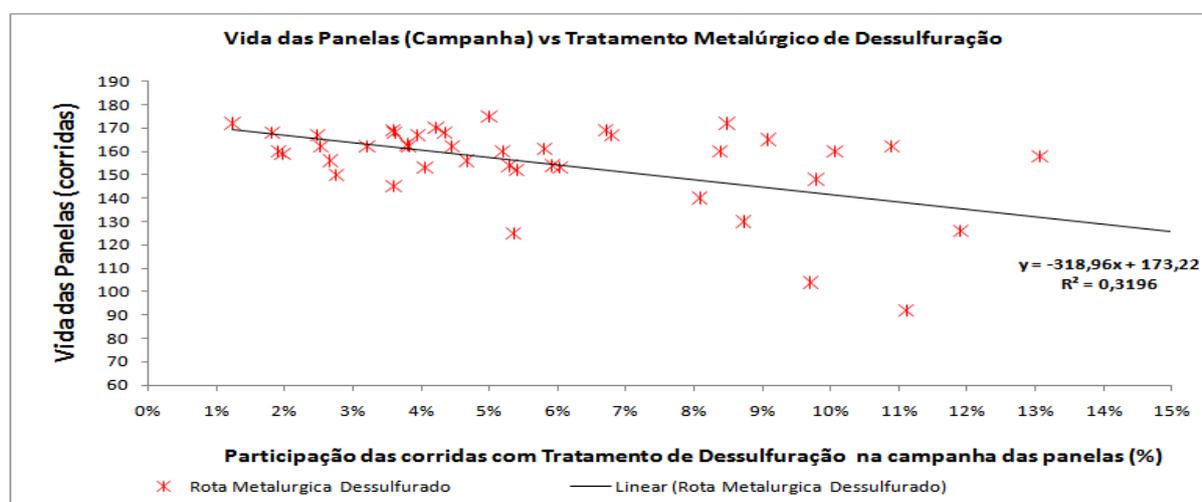


Figura 2. Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Dessulfurado.

Verifica-se que o aumento da participação, na campanha das panelas, de corridas que sofreram processo de dessulfuração impacta negativamente na vida refratária das panelas. Além das etapas básicas de ajuste de composição química e de temperatura, os processos que envolvem uma dessulfuração do aço para teores muito baixo de enxofre requerem altos tempos de processamento no refino secundário (no caso desta usina o forno panelas é o único equipamento do refino secundário capaz de realizar a dessulfuração), adições de fluxantes de escória como a nefelina e possíveis adições de fios de cálcio silício. Em média, o tempo de tratamento no refino secundário para este tipo de rota é 50 % maior que uma rota comum. Outro fato relevante é que o uso do forno panela em processo de dessulfuração expõe mais acentuadamente o revestimento refratário das panelas ao arco elétrico dos eletrodos, o que na prática, degrada a estrutura refratária das panelas. Logo, para uma compreensão total do impacto, ou melhor, influência do tempo de contato do aço e escórias com o refratário das panelas, foi analisado o tempo de tratamento do aço nas estações de refino secundário (*Power-On*). Esta análise foi feita considerando, para cada panela, a vida em função dos tempos médios de tratamento para cada campanha.

A análise ratificou as análises anteriores e, mostrou o grande impacto, que aumento nos tempos de tratamento no refino secundário reduz a vida da panela consideravelmente. Nos casos analisados (19 panelas) 12 delas (63,2%), apresentaram forte correlação negativa entre vida (campanha) e tempo de tratamento no refino secundário. Os gráficos das Figuras 3 e 4 ilustram as correlações negativas. Vale lembrar que o pequeno número de pontos nos gráficos nos dá uma falsa impressão de pequena amostragem, porém cada ponto representa uma campanha da panela, ou seja, cada ponto é na verdade uma média de 154 corridas com suas respectivas médias de tempo de tratamento no refino secundário.

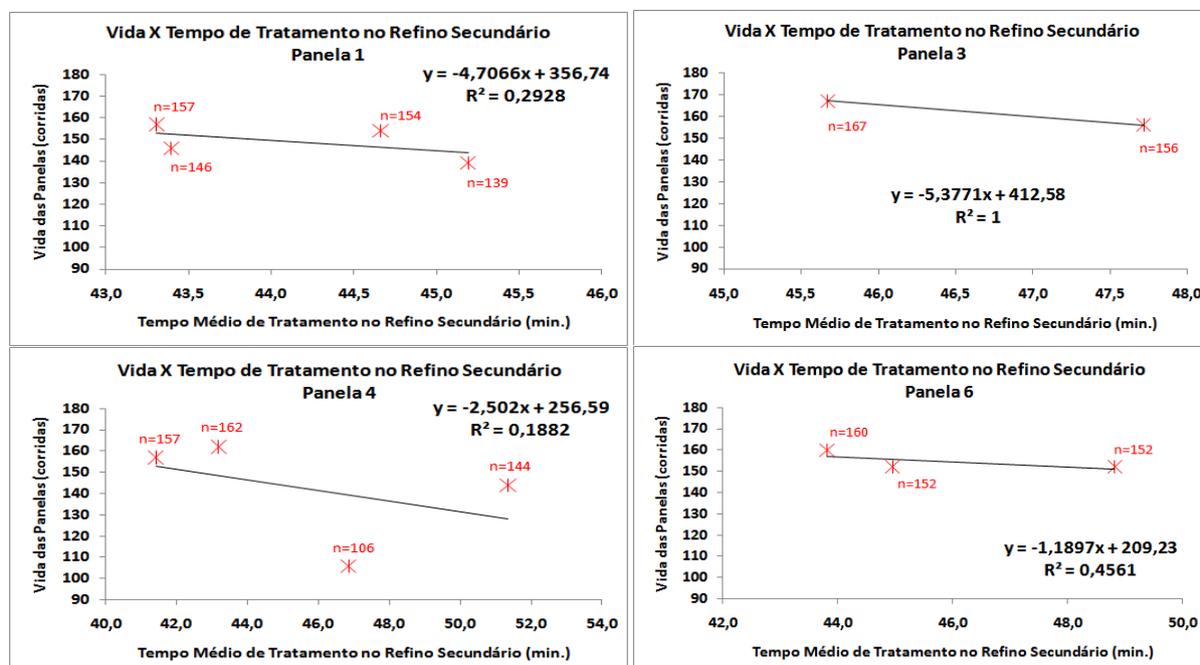


Figura 3. Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e o tempo médio de tratamento no refino secundário das panelas 1, 3, 4, 6, onde n é o número de corridas (Dados).

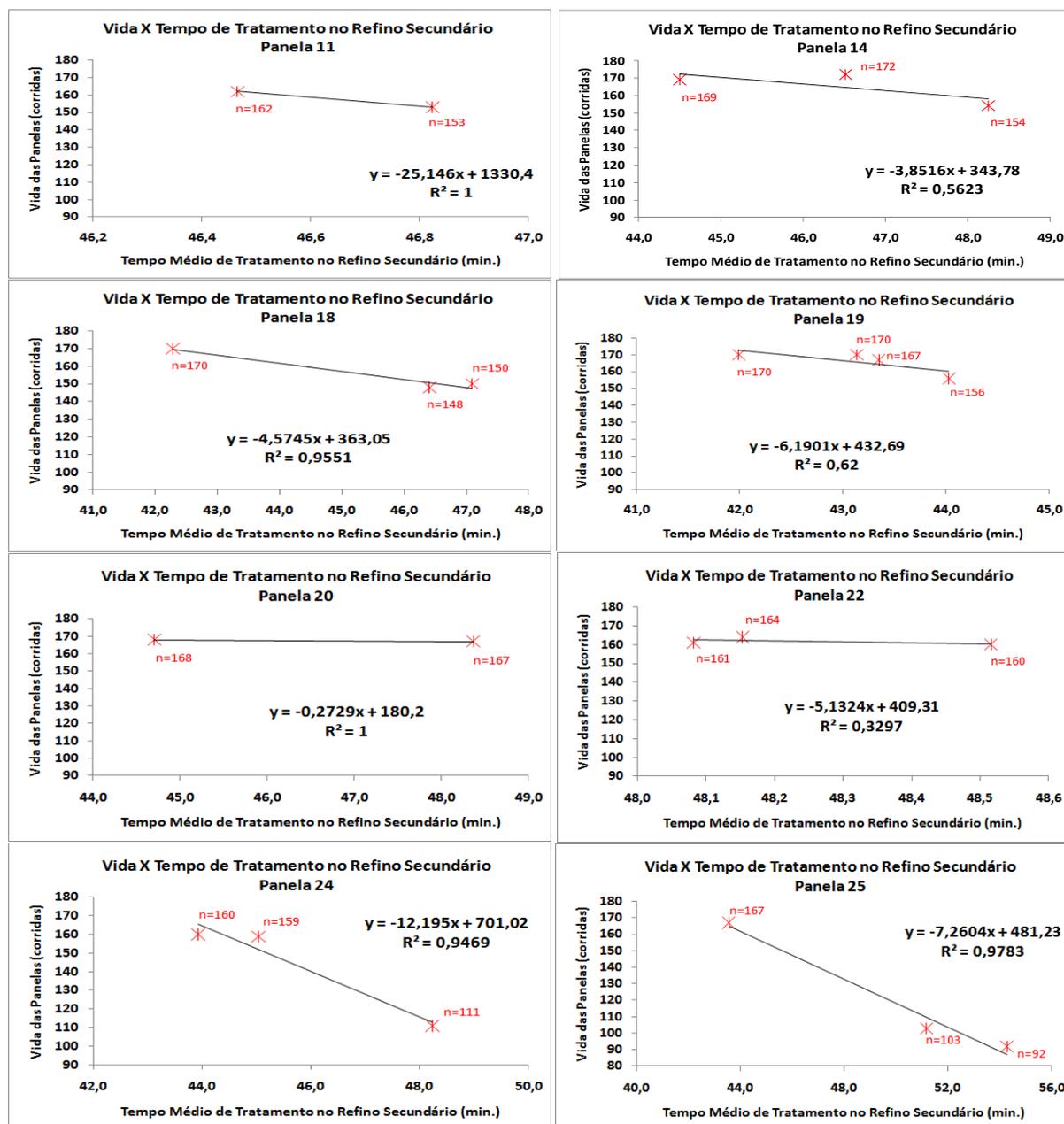


Figura 4. Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e o tempo médio de tratamento no refino secundário das painéis 11, 14, 18, 19, 20, 22, 24 e 25, onde n é o número de corridas analisadas (Dados).

Considerando a queda na vida das painéis com o aumento do tempo de tratamento no refino secundário, nos casos acima, esta queda média foi de 4 corridas por minuto a mais de tempo de tratamento, isto é, para cada minuto a mais de tratamento do aço no refino secundário em relação ao tempo médio estima-se que a previsão da vida do refratário das painéis seja reduzida em 4 corridas. Esta queda representa, se considerarmos uma vida média das painéis de 154 corridas, redução de 2,6% na vida refratária por minuto a mais de tratamento no refino secundário em relação ao tempo médio de tratamento. A análise visual das Figuras 3 e 4 revela que as inclinações das curvas (coeficiente angular) são diferentes para cada painél, ou seja, a vida pode ser mais ou menos impactada dependendo de algum fator intrínseco (estrutura refratária) ou extrínseco (tipo de equipamento de refino secundário utilizado para tratamento do aço, por exemplo). Partindo da hipótese de

que o revestimento refratário é semelhante entre as painéis (hipótese confirmada junto ao pessoal de manutenção refratária e fornecedores) e que o fator tipo de equipamento de refino secundário ao qual a panela será submetida ao longo de sua campanha é sempre citado na literatura e na área operacional como fator de grande relevância no desempenho das painéis, foi realizada uma análise para verificar a correlação entre o coeficiente angular (inclinação das curvas) e a participação percentual do tempo de tratamento de cada ajuste no refino secundário e o tempo total de tratamento metalúrgico. As análises confirmam as expectativas e mostram o impacto que o forno panela tem na degradação do refratário e consequentemente na vida das painéis. A Figura 5 ilustra o impacto negativo na vida das painéis quando a participação do forno panela é aumentada em detrimento do aumento dos demais equipamentos de refino (AHF, RH e EBA). Como pode ser visto na Figura 5, o único que possui inclinação negativa, ou seja, o aumento da participação do tempo total de tratamento deste refino diminui a expectativa de vida das painéis é o forno panela.

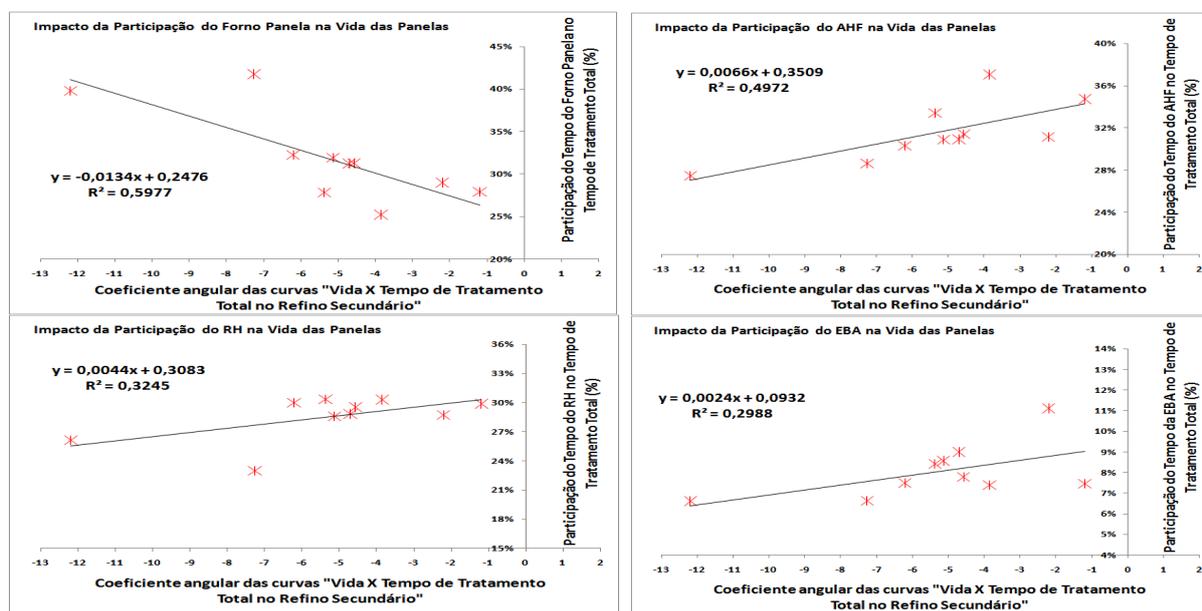


Figura 5. Impacto da utilização do Forno Panela, AHF, RH e da EBA na vida das painéis.

Cada ponto do gráfico apresenta a correlação de cada curva (coeficiente angular) com a participação percentual do tempo de tratamento em cada tipo de equipamento do refino secundário (forno panela, AHF, RH e EBA) com o tempo total da operação de refino. Nota-se (Figura 5) que o forno panela impacta negativamente (quanto maior participação % no tempo de tratamento total mais negativo é o coeficiente angular) em detrimento aos demais equipamentos que possui suas correlações totalmente opostas. O fator que mais difere o forno panela dos demais equipamentos (AHF e RH) é a forma de aquecimento que no forno panela é via arco elétrico e nos demais é via aquecimento aluminotérmico. A EBA é um equipamento que simplesmente faz algumas adições, homogeneização e sem aquecimentos. Outro fator relevante na análise desta rota de tratamento metalúrgico, além da utilização do forno panela e dos altos tempos de tratamento seria a utilização de fluxantes de escória como a nefelina, prática comum em algumas aciarias. Com o intuito de otimização do processo de dessulfuração para níveis baixos de enxofre no aço. A análise do consumo de nefelina (Tabela 5) para os diferentes grupos de aço comprovou as suposições acima e revelou, em termos de consumo específico por

grupo de aço, os altos consumos para os grupos de aço onde se praticam altas taxas de dessulfuração (grupo baixo enxofre e duplo refino da Tabela 5).

Tabela 5. Consumo específico de nefelina por grupos de aço

Grupo	Consumo Médio	Desvio em relação à média geral
Alto Carbono	0,49 kg/t.	18,8%
Baixo Enxofre	1,14 kg/t.	177,6%
Comum	0,15 kg/t.	-63,6%
Desgaseificado	0,06 kg/t.	-85,5%
Duplo Refino	1,06 kg/t.	158,4%
Peritético	0,53 kg/t.	28,6%
UBC-Geral	0,02 kg/t.	-94,7%
UBC-Usicore	-	-
Média Geral	0,41 kg/t.	-

A análise post-mortem nos refratários da linha de escória de uma das panelas da aciaria (Figura 6 e Tabela 5) revelou os grãos da estrutura refratária de MgO-C sendo corroídos por uma escória de panela rica em sódio. Como a única adição química feita que contém este elemento é a nefelina conclui-se que este composto contribui de forma decisiva na degradação refratária das panelas.

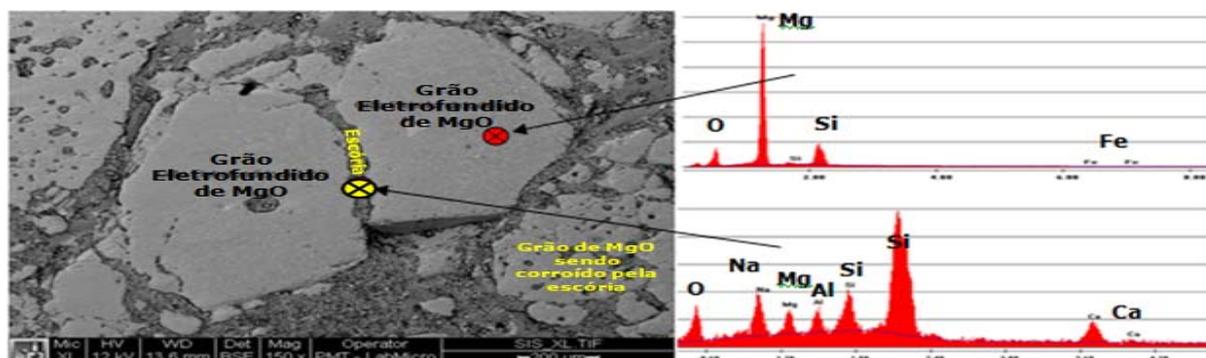


Figura 6. Imagem obtida (MEV) da região de interface (refratário/escória) do refratário das panelas. Grãos eletrofundidos de MgO (refratário) sendo corroídos pela escória infiltrada na matriz refratária.

Tabela 6. Análise química (MEV) dos grãos e da escória observados na região de interface. Escória rica em sódio, provavelmente nefelina. Análise semi-quantitativa (EDS)

Composição Química dos Grãos de MgO		Composição Química da Escória	
Composto	(%)	Composto	(%)
MgO	95,04	Na ₂ O	14,38
SiO ₂	1,70	MgO	12,27
FeO	3,26	Al ₂ O ₃	13,99
		SiO ₂	31,21
Total	100,00	CaO	28,16
		Total	100,00

A análise da região entre os grãos eletrofundidos de MgO (Figura 6) revela ser uma composição típica de escória (Tabela 6), o que comprova o exposto referente ao

ataque pela escória na matriz e nos grãos de refratário. Este mecanismo de desgaste do refratário da linha de escória parece ser o fenômeno predominante nesta região. Os resultados das análises estatísticas entre vida refratária das panelas e rota de tratamento metalúrgica de dessulfuração de aços mostraram que o aumento da participação deste tipo de refino de aço degrada a estrutura refratária das panelas de forma intensa. Esta redução da vida das panelas está diretamente ligada aos altos tempos de tratamento do aço que esta rota metalúrgica exige nas estações de refino secundário, em especial, no forno panela que é o equipamento utilizado, na aciaria analisada, para realização de tais práticas. Os altos tempos estão ligados a altas taxas e período de aquecimentos via arco elétrico e adições de fluxantes de escória como a nefelina. A análise de *post-mortem* indica que o fenômeno de desgaste refratário preponderante sofrido por tais panelas é majoritariamente um desgaste ocasionado por corrosão química pela escória. Portanto, as práticas usuais de realizar o tratamento metalúrgico de dessulfuração dos aços para níveis baixos de enxofre que nesta usina incluem a dessulfuração com a utilização do forno panela (arco elétrico), altos tempos de processo (exposição a vários aquecimentos e adições) e a utilização de nefelina como agente fluxante são fatores decisivos para o desempenho das panelas de aço da aciaria.

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que a rota de produção de aço dessulfurado, na qual se utiliza o forno panela para realização do refino secundário dos aços para baixo teor de enxofre, com adições de fluxantes como a nefelina e altos tempos de tratamento (Power on) reduz a expectativa de vida das panelas de aço na aciaria. Portanto, para um melhor desempenho da vida das panelas de transporte de aço é preciso racionalizar o uso do forno panela e da adição de fluxantes de escória que contém sódio.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa pela disponibilização dos dados de processo.

REFERÊNCIAS

- 1 QUINTELA, M. A. Caracterização de cerâmicas refratárias para panela de aço. Brasil, Universidade Federal de São Carlos, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2003.
- 2 BRAGANÇA, S. R. Corrosão de refratários utilizados na siderurgia. *Cerâmica* 58, 2012, 280-285.
- 3 FERREIRA, J. P. Estudo dos desgastes de refratários dolomíticos aplicados em panelas de aço na produção de aços ao carbono. Brasil, Diss. Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS (2010) 4-12.
- 4 Steel Statistics Yearbook 2015 - World Steel Association, disponível em www.worldsteel.org (2015), acesso em: fevereiro de 2016.
- 5 BRASIL, Ministério de Minas e Energia – SGM, Relatório Técnico 71, Cadeia de refratários, projeto ESTAL, agosto de 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P45_RT71_Perfil_dos_Refratxrios.pdf/ac0e01f1-cc6d-4071-b3d4-c157240fa132, acesso em: abril de 2016.
- 6 BILGIÇ, M. Parameters effecting life time of refractory in steelmaking. Sweden: Department of Material Science and Engineering, 2005. 21 p.
- 7 MATTILA, R. A.; VATANEN, J. P.; HARKKI, J. J. *Scandinavian J. Metallurgy* 31 (2002) 241-245.