

DESAFIOS DA ALA DE CORRIDA DE ALTOS-FORNOS: ANÁLISE DE FALHA DE CONCRETO REFRAATÁRIO PARA CANAL DE CORRIDA¹

Vitor Guarnier Domiciano²
Alexander Rabello Ollmann³
Eder Ivan Clemente⁴
Alamar Kasan Duarte⁵
Modestino Alves de Moura Brito⁶

Resumo

O cenário das usinas siderúrgicas no Brasil tem vivido grandes mudanças nos últimos anos como consequência da enorme competição no mercado mundial de aço. Nos Altos-Fornos, o uso de matérias-primas economicamente competitivas (minério de ferro, coque, combustíveis alternativos) tem permitido reduzir os custos de produção do ferro-gusa. Paralelamente, tem-se observado um quadro de oscilações nas condições operacionais dos Altos-Fornos, o qual tem apresentado impacto no desempenho dos concretos refratários de canais de corrida. A necessidade de ajustar os produtos às condições operacionais cada vez mais agressivas tem se mostrado um desafio para os fornecedores de refratários de maneira a garantir a segurança operacional e a disponibilidade dos canais de corrida para operação. Neste trabalho são apresentados os resultados de estudo post-mortem de um concreto refratário $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-SiO}_2\text{-C}$ utilizado em canal de corrida principal, o qual apresentou acentuado desgaste na linha de gusa. A caracterização físico-química, microscopias óptica e eletrônica de varredura permitiram identificar algo incomum nas amostras analisadas: a presença de quantidade significativa de K_2O dissolvida no banho de escória-metal, a qual sugere uma sinergia de mecanismos de desgaste, bem como, ilustra as condições severas às quais o revestimento de trabalho está sujeito no atual cenário da Área de Redução.

Palavras-chave: Canal de corrida; Concreto refratário; Post-mortem; Mecanismo de desgaste.

CHALLENGES OF BLAST FURNACE CASTHOUSE: FAILURE ANALYSIS OF MAIN RUNNER REFRACTORY CASTABLE

Abstract

The Brazilian Ironmaking scenario has experienced major changes in recent years as a result of the huge competition in the global steel market. In the Blast Furnace, the use economically competitive raw materials (iron ore, coke, alternative fuels, etc.) has allowed a reduction of production costs of hot metal. At the same time, frequent oscillations in the Blast Furnaces operating conditions has been noticed, which has shown a direct impact on the main runner refractory castables performance. The need to adjust the products to increasingly severe operational conditions has been a major challenge for refractory suppliers in order to guarantee the runner's safety and its availability for operation. This paper presents the results of a post-mortem study carried out with a main runner $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-SiO}_2\text{-C}$ refractory castable, which showed a remarkable wear in the metal line zone. The physico-chemical characterization, optical and scanning electron microscopy have identified unusual findings in the samples: the presence of significant amounts of K_2O dissolved in the slag-metal interface and infiltrated slag which suggests a synergy of wear mechanisms and illustrates the severe conditions to which the main runner's working lining could be subjected in today's Blast Furnace casthouse operation.

Key words: Main runner; Refractory castable; Post-mortem; Wear mechanism.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência e Engenheiro de Materiais, Pesquisador, Magnesita Refratários S/A, Contagem, MG, Brasil.

³ Engenheiro. Metalurgista, Especialista da Área de Redução, Magnesita Refratários S/A, Membro da ABM, Contagem, MG, Brasil.

⁴ Assistente técnico da Área de Redução, Magnesita Refratários S/A, Contagem, MG, Brasil.

⁵ PhD em Engenharia Metalúrgica, MSc. em Eng. Cerâmica, Consultor, Yamagata Consultoria, Membro da ABM, Contagem, MG, Brasil.

⁶ Engenheiro Metalurgista, MSc. em Engenharia Cerâmica, Superintendente de Pesquisa e Desenvolvimento, Magnesita Refratários S/A, Contagem, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Durante a operação dos canais de corrida de Alto-Forno, o refratário usado como revestimento de trabalho é submetido a condições extremas de temperatura (1490~1530°C) pelo contato com escória e metal líquidos, sofrendo erosão, choque térmico, oxidação (ar e vapor d'água) e corrosão pela escória e FeO. A campanha dos canais de corrida é determinada pela região de maior desgaste do revestimento refratário, que ocorre entre 3 m a 6 m a partir do furo de corrida, local chamado de zona de turbulência (ou zona crítica) devido à incidência do jato de escória e metal vazados do Alto-Forno que provoca intenso movimento do banho. Além disso, duas zonas de desgaste específicas são observadas na parede lateral do canal de corrida: linha de escória (interface escória-refratário-ar) e linha de gusa (interface escória-metal-refratário).

Os mecanismos de desgaste relacionados à linha de escória e linha de gusa já foram descritos em muitos trabalhos na literatura, os quais apontam diferentes fatores que influenciam o desgaste do refratário,⁽¹⁻¹¹⁾ tais como: condições operacionais do Alto-Forno (produtividade e intermitências operacionais, temperatura de vazamento, slag-rate, composição química do gusa e escória), projeto dos canais de corrida, tipo de refratário e práticas de manutenção, etc. Os estudos de post-mortem dos refratários usados em canais de corrida são fundamentais neste trabalho, pois permitem identificar os mecanismos de falha, os quais podem sugerir melhorias a serem realizadas tanto no refratário quanto no projeto dos canais de corrida, bem como, nas práticas de manutenção refratária cujo objetivo final é melhorar o desempenho dos canais de corrida, como também, oferecer maior segurança à operação da casa de corrida.

Nos últimos anos, as usinas siderúrgicas no Brasil têm vivido grandes mudanças como consequência da enorme competição no mercado mundial de aço. O uso de matérias-primas (minério de ferro, coque, combustíveis alternativos, etc.) economicamente competitivas tem se mostrado uma das principais alternativas para se reduzir os custos de produção do ferro-gusa nos Altos-Fornos. Neste cenário de mudanças, tem-se observado um quadro de oscilações nas condições operacionais dos Altos-Fornos (temperatura de vazamento, slag-rate, composição do gusa e escória, etc.), o qual tem apresentado impacto direto no desempenho dos refratários usados na casa de corrida, tais como a massa de tamponamento e os concretos e massas usados nos canais de corrida. A necessidade de ajustar os produtos às condições operacionais cada vez mais agressivas tem se mostrado um dos maiores desafios para os fornecedores de refratários de maneira a garantir a segurança operacional e a disponibilidade dos canais de corrida para operação. Neste trabalho são apresentados os resultados de estudo post-mortem de um concreto refratário $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-SiO}_2\text{-C}$ utilizado em canal de corrida principal, o qual apresentou acentuado desgaste na linha de gusa. A caracterização físico-química, microscopia óptica e eletrônica de varredura permitiram identificar algo incomum nas amostras: a presença de quantidade significativa de álcalis (K_2O) dissolvida no banho de escória-metal, a qual sugere uma sinergia de mecanismos de desgaste, bem como, ilustra as condições severas às quais o revestimento de trabalho está sujeito no atual cenário da Área de Redução.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo consistiu na determinação das características e propriedades de um concreto refratário ultra-baixo teor de cimento $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-SiO}_2\text{-C}$ após uso. Amostras de 2 regiões do canal principal (Figura 1) foram selecionadas: Zona Crítica (ZC) e Zona Não-Crítica (ZNC). Inicialmente, realizou-se uma inspeção visual das amostras. Medidas de porosidade aparente (P.A.), densidade de massa aparente (d.m.a.), resistência à flexão a temperatura ambiente (RFTA) e resistência à compressão a temperatura ambiente (RCTA) foram realizadas em no mínimo três corpos de prova (160x40x40mm) obtidos a partir do corte de amostras na Face Quente (FQ) e Face Fria (FF) do revestimento de trabalho. Uma porção residual dos corpos de prova obtida após ensaios mecânicos foi utilizada para análise química (Fluorescência de Raios-X). A média de 2 resultados de análise química foi considerada para determinação de um valor percentual comparativo tendo como referência os resultados de uma amostra do mesmo concreto refratário preparado em laboratório (Referência) e submetido a tratamento térmico (1500°C/5h – atmosfera redutora). Além disso, amostras foram selecionadas para microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo utilizado o recurso de Espectrometria por Dispersão de Energia (EDS) para realização de microanálise em algumas regiões.



Figura 1. (a) Esquema de amostragem em 2 regiões do canal de corrida principal; amostras de concreto refratário da (b) Zona Crítica (ZC) e (c) Zona Não-Crítica (ZNC).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra o revestimento de trabalho do canal de corrida em que se observou um intenso desgaste na linha de gusa (LG) comparativamente a linha de escória (LE). Apesar de visivelmente diferentes, a LE também apresentou uma elevada velocidade de desgaste.

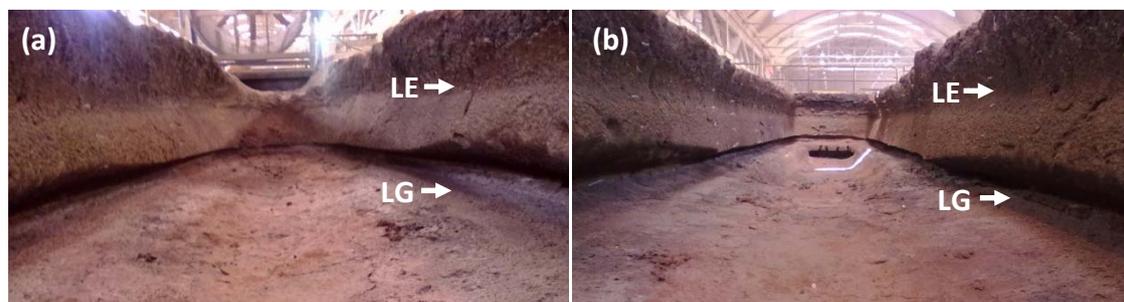


Figura 2. Aspecto do revestimento de trabalho do canal de corrida principal: (a) lado do furo de gusa; (b) lado skimmer. (LE = linha de escória; LG = linha de gusa).

A Figura 3 mostra a superfície de corte das amostras ZC e ZNC retiradas da região da LG. Inicialmente, através de uma inspeção visual, não foram observadas evidências de oxidação das amostras ao longo de sua espessura, exceto pela camada oxidada formada na face quente do revestimento. Além disso, não foram identificadas regiões que caracterizassem segregação de agregados e partículas finas do concreto refratário em diferentes superfícies de corte das amostras. No entanto, foram identificadas trincas em algumas regiões da amostra ZNC sugerindo a ocorrência de alguma laminação no revestimento na região da linha de gusa mesmo sendo constatado durante inspeção que a amostra apresentava “sonoridade metálica”, o que indica que o concreto refratário experimentara sinterização durante operação.

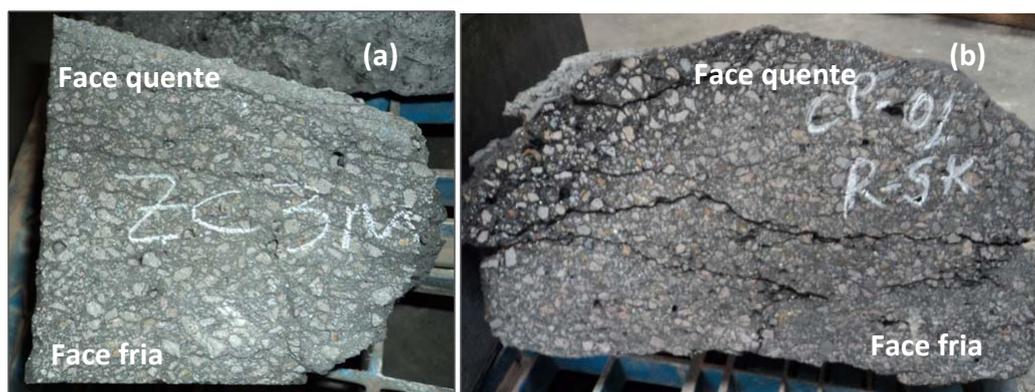
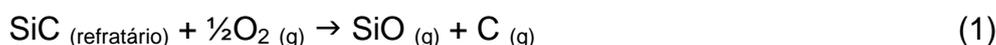


Figura 3. Superfície de corte das amostras (a) ZC e (b) ZNC na região da linha de gusa.

Os resultados de análise química revelaram uma redução no teor de carbeto de silício (SiC) em ambas amostras (ZC e ZNC) na face quente (FQ) comparativamente a face fria (FF) e amostra Referência, o que foi acompanhado por um aumento nos teores de sílica (SiO₂) e carbono (C) - (Tabela 1). Tal comportamento se mostrou mais evidente na amostra da ZNC e está relacionado ao mecanismo de degradação do SiC durante operação dos canais de corrida, o qual experimenta oxidação gerando SiO₂ e C, conforme descrito pelas Equações 1 e 2.

Tabela 1. Resultados de análise química e propriedades físicas para as diferentes amostras

Análise Química (%)	Referência 1500°C/5h	Após uso			
		Zona Crítica		Zona Não-Crítica	
		FQ	FF	FQ	FF
Al ₂ O ₃	100	99	99	97	102
SiC	100	90	100	69	98
C	100	151	120	201	86
SiO ₂	100	166	118	356	82
CaO	100	103	102	104	93
Na ₂ O	100	114	121	129	79
K ₂ O	100	288	138	838	113
Propriedades físicas					
d.m.a. (g/cm ³)	2,95	2,93	2,94	2,97	2,96
P.A. (%)	14,9	14,1	15,3	13,5	15,1
RFTA (MPa)	13	12	11	6	12
RCTA (MPa)	66	87	59	43	61





Os teores de Al_2O_3 e CaO não apresentaram alterações significativas nas amostras. Outros óxidos considerados prejudiciais para o desempenho do refratário, tais como Fe_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 e MnO - não mostrados na tabela - também não apresentaram variações relevantes. No entanto, um teor incomum de álcalis (Na_2O e especialmente K_2O) foi identificado.

Os resultados da caracterização física (Tabela 1) revelaram uma estreita faixa de variação para os valores de densidade (d.m.a.) de todas as amostras ZC e ZNC quando comparado à Referência. Os valores de porosidade (P.A.), por sua vez, sugerem que a face quente (FQ) do revestimento de trabalho tenha experimentado sinterização, uma vez que se observou diminuição da porosidade quando comparado à face fria (FF). Os resultados de resistência mecânica detectaram um aumento significativo de RCTA na face quente da amostra ZC, o que corrobora com a suspeita de maior sinterização. No entanto, tal comportamento não foi observado nas amostras ZNC, onde na face quente se observou uma ligeira redução da RCTA. Finalmente, os resultados de RFTA não apresentaram variações significativas, exceto pelo resultado obtido na amostra ZNC – face quente que se mostrou inferior. A microscopia óptica realizada permitiu identificar algumas características microestruturais nas amostras após uso. Inicialmente, foram encontrados poros arredondados distribuídos na matriz de ambas as amostras ZC e ZNC (Figura 4a). Em seguida, trincas e poros preenchidos com fase líquida também foram observados em ambas as amostras (Figura 4b). A Figura 5 apresenta um conjunto editado de imagens que ilustra a face quente da amostra ZC em contato com a escória de Alto-Forno, na qual é possível observar um caminho de infiltração da escória além de poros preenchidos com fase líquida. A Figura 6, por sua vez, revela a ocorrência de uma fase contínua na matriz do concreto, a qual envolve as partículas finas próximo à região da face quente. Estas observações sugerem que a ocorrência de infiltração de escória e/ou extensa formação e difusão de fase líquida poderiam prejudicar a resistência ao dano por choque térmico do revestimento de trabalho devido a um excesso de sinterização da matriz do concreto refratário.

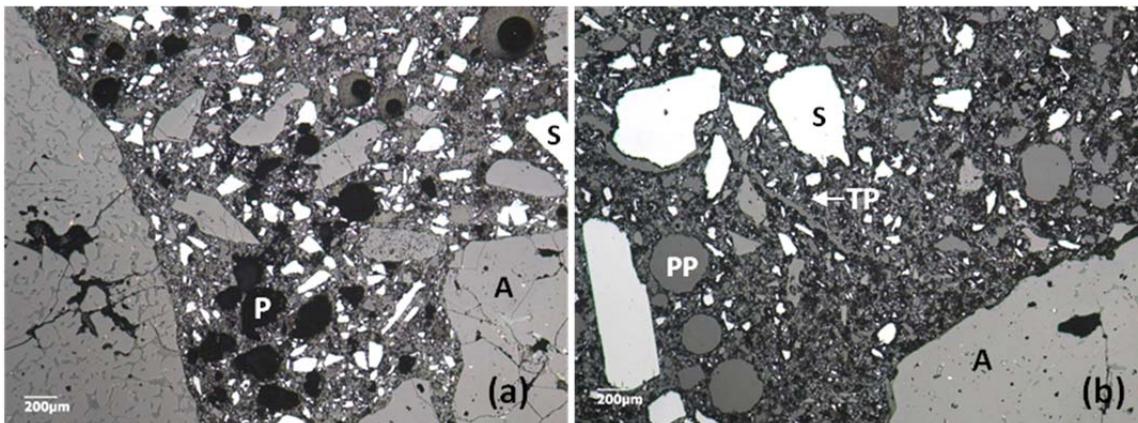


Figura 4. Microscopia óptica das amostras : (a) ZC e (b) ZNC. (A = Alumina; S = SiC; P = Poro; PP = poro preenchido com fase líquida; TP = trinca preenchida com fase líquida).

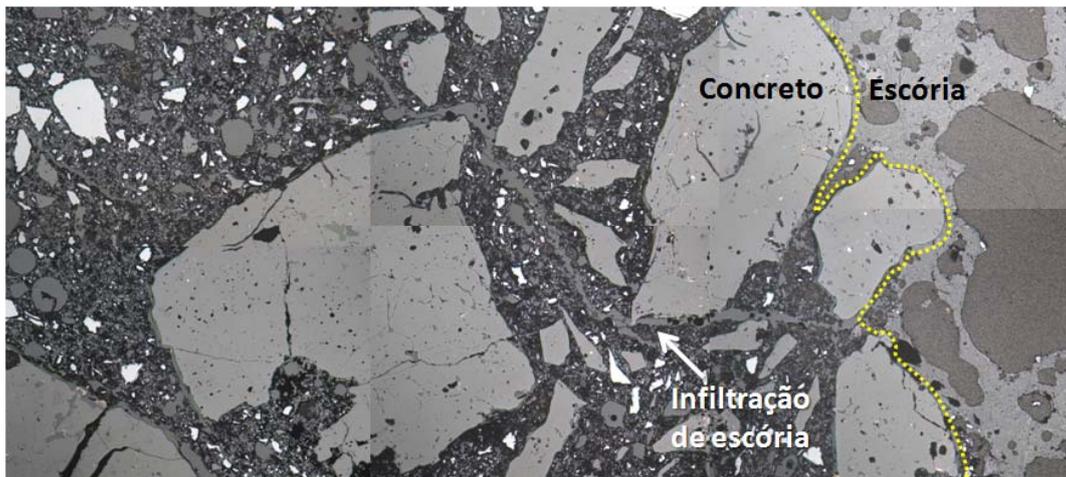


Figura 5. Conjunto editado de imagens mostrando a face quente do concreto refratário em contato com a escória.

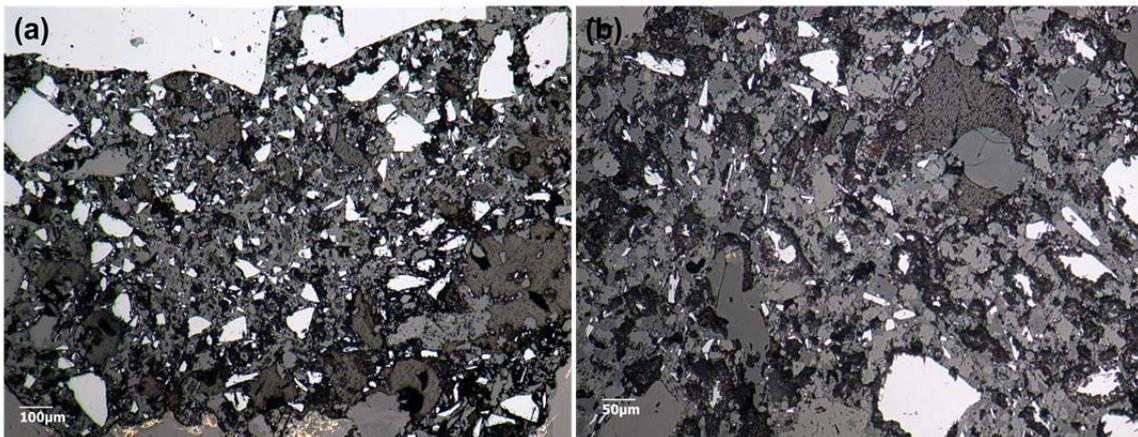


Figura 6. Microscopia óptica das amostras de concreto refratário próximo a face quente do revestimento de trabalho: (a) ZC e (b) ZNC.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada com o objetivo de investigar detalhadamente as características microestruturais apontadas pela microscopia óptica. A Figura 7 mostra a estrutura de um poro parcialmente preenchido com fase líquida que se apresenta na forma de esferas aderidas à superfície interna do poro (Amostra ZC). Aparentemente, esta imagem ilustra os primeiros estágios de preenchimento dos poros com fase líquida. Os resultados da microanálise (Tabela 2) referentes aos pontos indicados na Figura 7b revelam a concentração de álcalis (K_2O e Na_2O) nas esferas (pontos 1 e 2) comparativamente a superfície interna do poro (ponto 3). A Figura 8, por sua vez, ilustra uma região da amostra ZNC em que se observam poros arredondados e uma micro-trinca totalmente preenchidos com fase líquida. Mais uma vez, os resultados de microanálise (Tabela 2) revelaram a presença de quantidade significativa de K_2O e Na_2O . Finalmente, realizou-se a microanálise de uma região da amostra ZC semelhante à Figura 6, a qual é apresentada na Figura 9. Os resultados obtidos indicam a presença de potássio (K) difundido na matriz do concreto refratário.

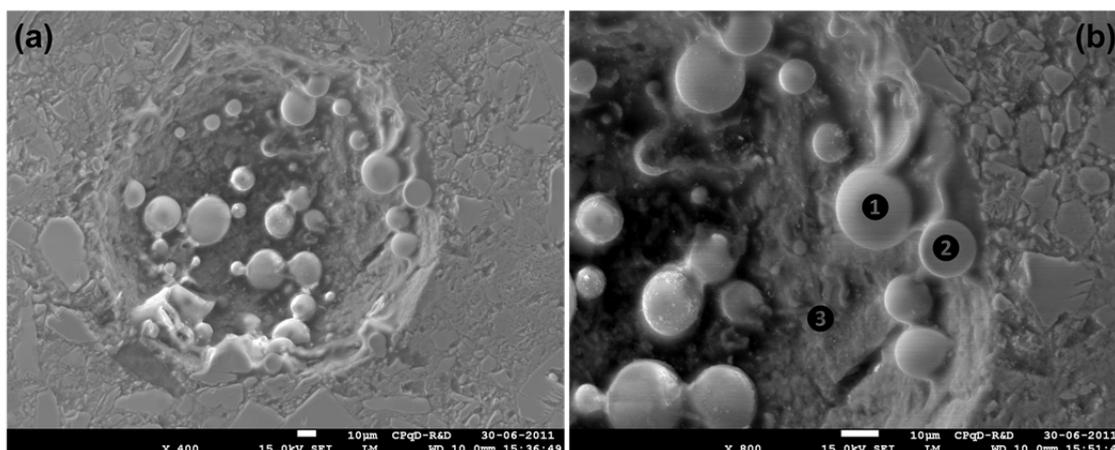


Figura 7. Micrografias da amostra ZC: (a) poro parcialmente preenchido com fase líquida (esferas aderidas à superfície); (b) imagem ampliada da mesma região para microanálise.

Tabela 2. Resultados de microanálise das amostras ZC (Figura 7b – pontos 1,2 e 3) e ZNC (Figura 8 – pontos 4, 5, 6, 7, 8 e 9)

MICROANÁLISE	Pontos								
	Amostra ZC			Amostra ZNC					
Análise química (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Al ₂ O ₃	22,72	23,38	16,25	25,54	24,66	25,56	25,42	24,7	25,32
SiO ₂	49,43	50,04	24,61	48,01	48,34	47,01	47,29	48,74	46,97
C	12,74	12,01	56,42	10,94	11,37	11,26	11,35	11,44	11,61
CaO	4,28	3,66	1,46	2,79	2,75	2,87	3,06	3,10	2,93
MgO	0,05	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02
Na ₂ O	1,65	1,67	0,33	1,38	1,42	2,59	1,46	1,40	1,47
K ₂ O	9,13	9,21	0,92	11,33	11,44	10,68	11,41	10,61	11,68

Em função dos resultados obtidos ao longo do estudo post-mortem, procurou-se avaliar mais detalhadamente as características do material aderido a face quente da amostra ZC na região da linha de gusa próximo ao ponto de maior desgaste no canal de corrida. A Figura 10 mostra a microestrutura deste material na qual é possível identificar 3 fases distintas. Os resultados de microanálise (Tabela 3) revelaram que a fase majoritária (ponto 1, Figura 10b) é composta principalmente por FeO e C. Já uma das fases secundárias (ponto 2) é constituída por uma combinação de FeO, SiO₂ e C, sugerindo ser Faialita (FeO·SiO₂), composto de baixo ponto de fusão (1205°C) associado ao mecanismo de corrosão que acontece na linha de gusa dos canais de corrida.⁽³⁻⁷⁾ Nesta fase, verificou-se a presença de K₂O. Finalmente, a fase em menor proporção (ponto 3) é composta por uma mistura de FeO, SiO₂, CaO e Al₂O₃, o que sugere ser a escória na qual também foi encontrado K₂O. Estas evidências indicam que amostra analisada trata-se do material da interface entre escória e gusa, o qual é composto por uma mistura de diferentes óxidos e carbono. A presença de quantidade significativa de K₂O na escória de Alto-Forno (Tabela 4), bem como, nesta região da linha de gusa, sugere que o filme de escória formado na interface escória-gusa-refratário^(6,7) tenha experimentado uma redução de viscosidade, o que, além de facilitar sua infiltração no refratário, promove um aumento na taxa de transferência de massa intensificando a velocidade de desgaste do revestimento refratário.

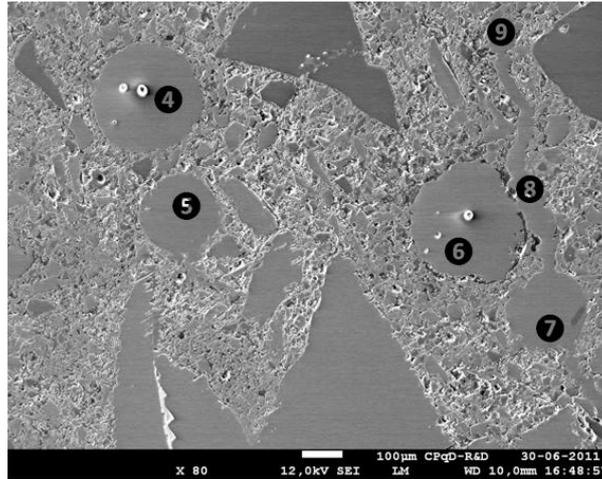


Figura 8. Micrografia da amostra ZNC: poros arredondados e micro-trinca preenchidos com fase líquida na matriz do concreto refratário.

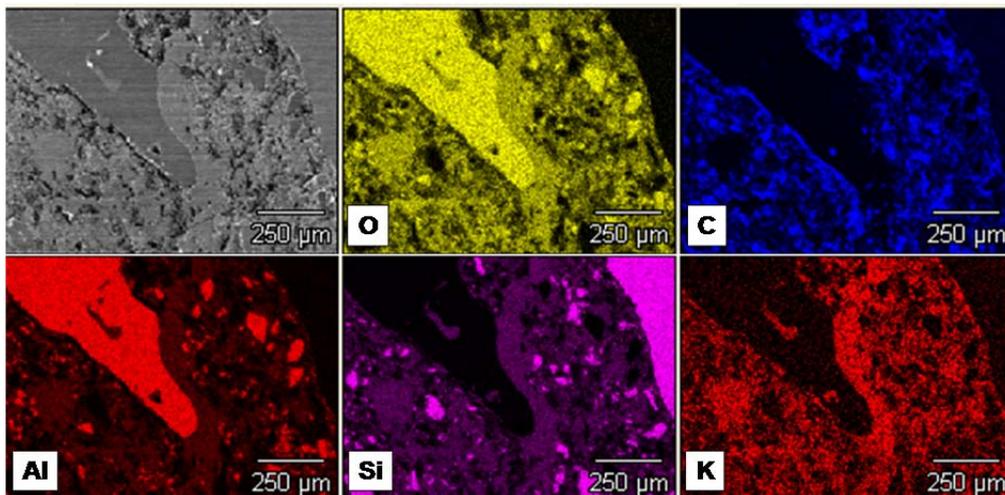


Figura 9. Microanálise da matriz do concreto refratário (amostra ZC).

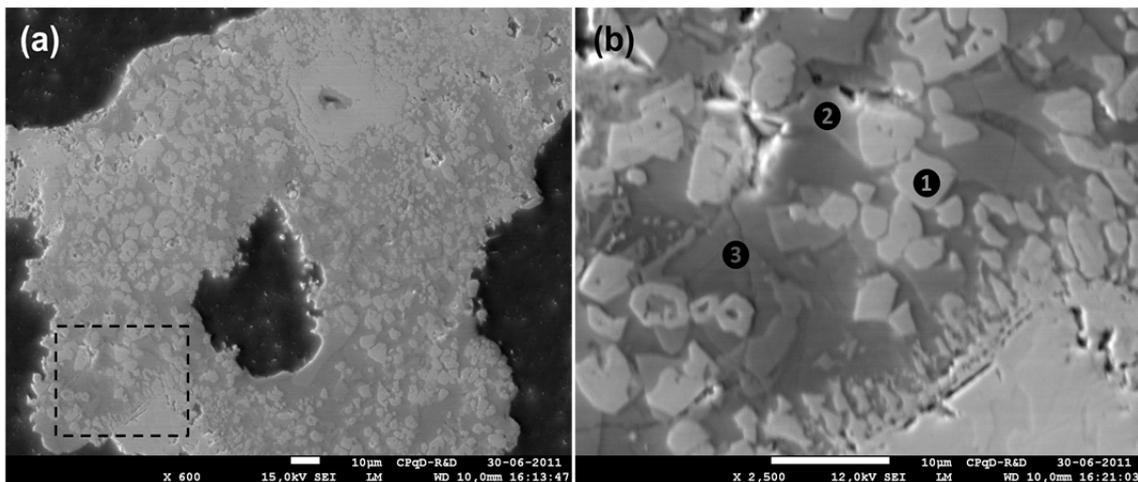


Figura 10. Micrografias da escória-metal aderida à superfície da amostra ZC na região da linha de gusa: (a) visão geral; (b) imagem ampliada que permite identificar 3 fases distintas.

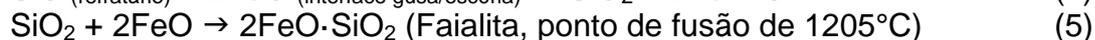
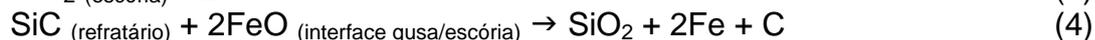
Tabela 3. Resultados de microanálise da escória-metal aderida à face quente do concreto refratário na região da linha de gusa (pontos 1, 2 e 3 da Figura 10b)

MICROANÁLISE	Pontos		
Análise química (%)	1	2	2
FeO	87.89	48.78	27.23
CaO	1.13	-	23.91
SiO ₂	1.50	30.13	33.04
Al ₂ O ₃	0.91	4.93	4.88
MgO	1.00	2.45	0.63
K ₂ O	-	2.11	1.14
C	7.58	11.60	9.16

Tabela 4. Análise química de amostras de escória de Alto-Forno e moinha de carvão (cinzas).

Análise Química (%-p)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O
Escória de Alto-Forno	44,85	38,03	10,31	4,73	0,485	0,44	0,58	0,02	0,18	0,38
Moinha de carvão (cinzas)	19,2	45,9	14,76	3,61	10,44	1,01	0,64	0,91	0,48	3,05

A eliminação de quantidades expressivas de álcalis através da escória em canais de corrida é considerado algo incomum pelos operadores de Alto-Forno. Os álcalis oriundos da carga apresentam um caráter volátil dentro do Alto-Forno, sendo parcialmente eliminados durante operação. Entretanto, sabe-se que uma fração destes álcalis re-circula no interior do reator, em ciclos de evaporação/condensação, o que poderia contribuir para sua eliminação no canal de corrida. Uma das hipóteses consideradas para tentar explicar a ocorrência de álcalis dissolvidos na interface escória-metal no canal de corrida teria origem na utilização de combustíveis alternativos (finos de carvão vegetal, moinha de carvão, etc.) que são injetados através das ventaneiras do Alto-Forno⁽¹²⁾ que estão próximas ao furo de corrida. A caracterização da moinha de carvão utilizada revelou, além de um teor considerável de voláteis (19%), a ocorrência de K₂O na composição de suas cinzas (Tabela 4). A presença de K₂O na interface entre escória e gusa no canal de corrida poderia desencadear uma sinergia de mecanismos de desgaste na linha de gusa relacionadas à oxidação do SiC pelo FeO,^(3,4,6,7) descritas nas equações abaixo.



O K₂O produz um aumento no potencial de oxigênio da escória, o que pode deslocar o equilíbrio da reação redox diminuindo a razão Fe⁺³/Fe⁺² favorecendo a formação de FeO na interface escória-gusa. Estudos realizados em escórias ricas em potássio no sistema K₂O-FeO-Fe₂O₃-SiO₂ demonstram este comportamento⁽¹³⁾ e revelam que a difusão do potássio na escória fundida ocorre de forma mais rápida que sua eliminação via fase gasosa. Tais observações corroboram para explicar o intenso desgaste observado na linha de gusa do canal de corrida.

4 CONCLUSÕES

A caracterização de amostras do concreto refratário usado no canal de corrida permitiu identificar a ocorrência de infiltração de escória de Alto-Forno. Microanálises realizadas em diferentes regiões de infiltração, trincas e poros preenchidos com fase líquida na face quente do revestimento de trabalho identificaram uma quantidade significativa de álcalis (K₂O) dissolvidos na escória. A presença de K₂O na escória do Alto-Forno tem impacto direto no desempenho do concreto refratário, uma vez

que a escória experimenta uma redução no seu ponto de amolecimento além de uma diminuição de sua viscosidade, o que facilita sua infiltração no refratário e promove um aumento da taxa de transferência de massa intensificando a velocidade de desgaste do revestimento. O intenso desgaste observado na linha de gusa foi associado a uma sinergia de mecanismos de desgaste na qual o K_2O poderia favorecer a formação de FeO na interface escória-gusa aumentando o ataque (oxidação) sobre o SiC do concreto refratário.

REFERÊNCIAS

- 1 IIDA, M.; SUZUKI, K. Influence of Blast Furnace productivity on corrosion rate of main trough. Shinagawa Technical Report, vol. 54, 25-34 (2011).
- 2 IIDA, M. Effect of temperature on the dissolution of Al_2O_3 - SiC -C castables in Blast Furnace slag. Journal of the Technical Association of Refractories, Japan, 32 [4] 271-276 (2012).
- 3 DOMICIANO, V.G. et al. Influência dos teores de FeO e MnO da escória no desgaste de refratários de canais de corrida de Altos-Fornos. 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas - 19 a 22 de setembro de 2010 – Belo Horizonte – MG – Brasil.
- 4 DOMICIANO, V.G. et al. Does the MgO content of the Blast Furnace slag affect the performance of main troughs? – Unitecr 2009, Salvador, Brazil, paper 141.
- 5 SCHUETZ, J. New RHI ULC castables based on Al_2O_3 - SiC -C for Blast Furnace runners. 5th IAS Ironmaking Conference, p. 409-418, 2005, San Nicolas, Argentina.
- 6 YOSHITOMI, J. et al. Local corrosion of iron trough refractories in the slag-metal interface. Aachen Proceedings, p. 85-89, 1998.
- 7 YOSHITOMI, J. et al. Local corrosion of Blast Furnace trough material at the slag-metal interface. Taikabutsu Overseas, vol.7, no. 3, p. 20-24, 1987.
- 8 DUARTE, A.K. et al. Segurança Operacional em canais de corrida do AF2 da CST. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.4, n.4 (2008).
- 9 MAEDA, E. Corrosion mechanism of slag-line materials in Blast-Furnace main trough. Journal of the Technical Association of Refractories, Japan, 30 [2] 90-99 (2010).
- 10 YASUO, K.; KITAMURA, M.; IIDA, T. Effect of operating conditions on Blast Furnace trough ML castable deterioration. Shinagawa Technical Report, vol. 54, 15-24 (2011).
- 11 IIDA, M.; MAEDA, E.; OKAMOTO T. Effect of SiC oxidization on corrosion resistance of castable for metal line of blast furnace main trough. Journal of the Technical Association of Refractories, Japan, 27 [2] 90-95 (2007).
- 12 MARQUES, M.B. et al. Co-injeção de gás natural, moinha de carvão vegetal e carvão mineral no Alto-Forno "A" da ArcelorMittal Monlevade. 42º. Seminário de Redução e Minério de Ferro e Matérias-Primas, 12 a 16 de Setembro de 2011 - Vila Velha - ES, Brasil.
- 13 TANGEMAN, J.A.; LANGE, R.; FORMAN, L. Ferric-ferrous equilibria in K_2O - FeO - Fe_2O_3 - SiO_2 melts. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 65, n.º.11, pp. 1809-1819, 2001.