

Identificação e avaliação dos mecanismos de ataque da escória SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO em tijolos refratários de MgO-C

TROMMER, R.M.; CORREIA LIMA, A.N.; VICENZI, J.;
ZIMMER, A.; BRAGANÇA, S.R.; BERGMANN, C.P.

Laboratório de Materiais Cerâmicos - LACER – PPGEM/UFRGS
Centro, Porto Alegre, RS. CEP: 90035-190

e-mail: rafael_trommer@yahoo.com.br, alvaro_niedersberg@yahoo.com.br,
jvicenzi@ufrgs.br, zimmer@ufrgs.br, saulorb@ufrgs.br, bergmann@ufrgs.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo identificar e caracterizar mecanismos responsáveis pelo desgaste dos tijolos refratários de magnésia-carbono de uma panela de aciaria, devido ao ataque da escória SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO. Para tanto, tijolos refratários MgO-C utilizados na linha de escória de uma panela industrial foram comparados com tijolos após o uso (*post mortem*). A microestrutura da região interfacial escória / refratário foi avaliada por análises mineralógicas (difração de raios X), microscopia eletrônica de varredura e microscopia óptica (lâminas petrográficas). Foi possível constatar que o tijolo *post mortem* apresenta, além das fases já existentes *in natura*, novas fases como a alumina, o silicato de cálcio e a gelenita devido à sua reação com a escória. Os resultados sugerem que o principal meio de degradação do tijolo se estabeleça pela infiltração da escória na matriz entre os grãos do tijolo refratário. Isto ocasiona o arrancamento de grãos, comprometendo a microestrutura original do material refratário, diminuindo seu tempo de vida útil.

Palavras chaves: Tijolos refratários de MgO-C, ataque da escória, microestrutura.

Evaluation of SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO slag mechanism attack in MgO-C refractory bricks

ABSTRACT

The present work has as objective to identify and to characterize the responsible mechanisms for the degradation of magnesia-carbon refractory bricks of a metallurgical ladle, due to the attack of the SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO slag. For that, MgO-C refractory bricks used in the slag line were compared with bricks after the use (*post mortem*). The microstructure of the interfacial region refractory brick/slag was evaluated by mineralogical analyzes (X-rays diffraction), scanning electronic microscopy (SEM) and thin sections for petrography analyses (optic microscopy). It was possible to evidence that the brick *post mortem* presents, beyond the existing phases already *in natura*, new phases such as alumina, calcium silicate and gelenite, due to its reaction with the slag. The results suggest that the main way of degradation of the brick was the infiltration of the slag in the matrix and grains boundaries of the refractory brick. This causes to the pulling out of grains, compromising the original microstructure of the refractory material, diminishing its time of useful life.

Keywords: MgO-C refractory bricks, slag attack, microstructure.

1 INTRODUÇÃO

Embora o desgaste de tijolos refratários seja inerente ao processo de produção de aço, a indústria siderúrgica está sempre interessada em uma maior vida útil nos revestimentos de equipamentos como fornos e panelas, pela importância dos materiais utilizados na qualidade do aço e na minimização de custos. Conforme o tipo de refratário e, principalmente, a região em que esse é empregado, a corrosão química devido ao ataque da escória pode ser o principal fator da degradação do material. Por exemplo, em refratários de linha de escória, a composição das escórias e dos materiais refratários utilizados passa a ser crítica. Assim, a tendência a um menor potencial químico no sistema definido pela interface escória/refratário é comumente

o principal fator para a degradação do material refratário. O tijolo refratário pode sofrer dissolução se o fluido circundante, como escórias metalúrgicas, não estiver saturado em um ou outro componente da composição do tijolo [7].

As reações químicas entre a escória e o material refratário teriam 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 [3]. Essa questão eminentemente termodinâmica, onde a temperatura desempenha fundamental importância na velocidade da definição das composições de equilíbrio entre as fases presentes, pode ter ainda a cinética das reações químicas envolvidas favorecida por sollicitações mecânicas (como erosão e esforços de compressão, flexão e tração) que por si só exercem forte influência no desgaste dos tijolos refratários.

SEGADÃES (1997) [10] define escórias como misturas de óxidos em fusão que se formam à superfície dos banhos de metais líquidos. A escória de aciaria é um subproduto da produção do aço. Este material é, portanto, resultado da agregação de diversos elementos que não interessam estar presentes no aço. Tem como características marcantes ser composta de muitos óxidos, como CaO e MgO, e ser expansível, devido às reações químicas desses óxidos. As limitações encontradas no material são basicamente: heterogeneidade; alto teor de cal livre e a ausência de atividade hidráulica. Dentre as funções da escória durante a produção do aço pode se destacar a proteção do aço contra a oxidação, proteção do aço contra a absorção de nitrogênio e hidrogênio, diminuir a perda de calor do aço, absorver as inclusões, etc.

Os refratários de magnésia-carbono (MgO-C) têm sido intensamente usados em aciarias, principalmente devido a sua alta refratariedade, excelente resistência à corrosão e ao choque térmico. Estas propriedades estão associadas à elevada condutividade térmica, baixa expansão térmica e elevada resistência à penetração da escória dada pela baixa molhabilidade do grafite por óxidos em geral [5].

Os tijolos refratários de MgO-C são basicamente compostos de pequenos grãos de magnésia (50 - 500µm), agregados de magnésia (1 – 7 mm) e flocos de grafite (50 – 500 µm em comprimento) ligados por uma resina de natureza orgânica. Normalmente, em tijolos comerciais a quantidade de magnésia fica em torno de 80 a 93 % em peso, enquanto que o grafite varia entre 7 a 20% em peso e os antioxidantes quando adicionados podem chegar até 8% em peso.

Segundo JANSSON (2005) [6], a corrosão dos refratários situados na região que fica em contato com a escória resulta de 3 mecanismos primários. O primeiro é a dissolução ou difusão do material refratário, no caso a magnésia, para a escória líquida. Outro mecanismo é a penetração da escória no refratário e que causa efeitos mecânicos e químicos. SEGADÃES (1997) [10] cita que a corrosão química dos tijolos refratários começa pela penetração da escória através dos poros, seguido pela remoção da matriz e que faz com que os grãos fiquem soltos e posteriormente sejam arrancados dos refratários. O outro mecanismo citado por Jansson é a erosão, que está associada à movimentação de gases e escória.

Dependendo do tipo de refratário e escória em contato, a velocidade de corrosão poderá ser diminuída através da redução da superfície exposta ao ataque (pela diminuição da rugosidade e porosidade do refratário) ou então pela diminuição da temperatura do sistema [10].

Uma análise bastante interessante para interpretação do estado da corrosão é sugerida por Brosnan (2004) [3]. A corrosão ocorre na superfície imediata da face quente – também chamado de estágio I da corrosão por escórias. A penetração é auxiliada pela sucção capilar, em que poros <10 µm arrastam o líquido para trás da face quente, atingindo o estágio II. Neste estágio, devido ao amplo intervalo de caimento de temperatura, percebe-se a ampla penetração de escória e rompimento parcial na face quente entre agregados e matriz, ocorrendo o desprendimento parcial da face, em geral nas paradas de operações. Em caso de taxas relativamente lentas de corrosão e quando desprendimento parcial da face quente não ocorrer, a corrosão chega ao estágio III, no qual a escória parece ser a única face. Este aspecto é, provavelmente, uma consequência da elevada viscosidade da escória criada pela dissolução do refratário.

Este trabalho versa sobre o ataque à microestrutura de tijolos refratários MgO-C pela escória e os mecanismos que se estabelecem na interface escória/refratário que contribuem no processo de degradação de tijolos MgO-C. Procurou-se fazer uma avaliação do estado de corrosão dos refratários analisados, objetivando-se caracterizar e identificar os mecanismos de corrosão presentes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Tijolo Refratário

Para identificar e avaliar os mecanismos de ataque da escória SiO₂-CaO-Al₂O₃-MgO, foram utilizados tijolos refratários comerciais com grãos de magnésia eletrofundida e sinterizada, sendo estes ligados a piche (presença de grafita de alta pureza) e posteriormente curados. Estes tijolos refratários também contam com a presença de agentes antioxidantes, que são empregados para minimizar a perda de carbono

(descarbonetação) dos tijolos durante sua vida útil. Este tipo de tijolo refratário é muito utilizado na indústria siderúrgica em fornos elétricos e fornos panela, principalmente na região da linha de escória e linha de metal.

2.2 Absorção de Água, Porosidade Aparente, Densidade Aparente Resistência Mecânica

Os tijolos refratários de magnésia-carbono foram caracterizados quanto à resistência mecânica à compressão [1], absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente [2]. Desta forma, para o ensaio de resistência mecânica à compressão, foram cortadas seis amostras de dimensões aproximadas de $51 \times 51 \times 51 \text{ mm}^3$, obtidas a partir de 6 tijolos diferentes. Uma vez que as faces superiores e inferiores das amostras não estavam suficientemente paralelas para efetuar a caracterização por resistência à compressão, uma das faces de cada amostra foi lixada até ficar paralela à face oposta. As amostras dos tijolos refratários foram secas em estufa a 110°C , por aproximadamente 24 horas. Os corpos-de-prova foram então submetidos ao ensaio de resistência à compressão, com a força sendo aplicada no sentido de conformação do tijolo a uma taxa de 40KN/min. Para a avaliação da absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente foram cortados seis corpos-de-prova de aproximadamente $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$, obtidos a partir de seis tijolos diferentes. As amostras foram secas na estufa a 110°C durante 24 horas e depois foi medido o peso seco na balança com precisão de 0,001g.

2.3 Análise da Microestrutura

A análise da microestrutura de tijolos MgO-C foi inicialmente realizada com o auxílio de um microscópio de luz transmitida (fotomicroscópio Leitz Aristomet). Para tanto, lâminas petrográficas de um tijolo novo (*in natura*) e de um tijolo após uso (*post mortem*) foram preparadas, obedecendo a seqüência de extração da amostra (Struers Discoplan-TS), fixação por colagem em uma lâmina de vidro, desgaste até a obtenção de uma espessura de aproximadamente $30 \mu\text{m}$ e polimento com suspensão de alumina em água em uma politriz (Struers Abramin). O procedimento de preparação das amostras é baseado em Elssner (1999) [4]. Por se tratar de material calcinado à morte e/ou eletrofundido não apresenta problemas de hidratação [8]. Os resultados mostraram que a água presente no polimento, por rápido período de tempo, não interferiu nesta análise, uma vez que os tijolos não apresentaram fases hidratadas, nem sinal de deterioração. Sabe-se que longos tempos expostos a ambientes úmidos pode levar a degradação de tijolos MgO-C, via a formação de fases expansíveis [9].

Para análise por microscopia eletrônica de varredura – MEV - (Jeol JSM-5800) e microanálise química (microsonda de energia dispersada EDS - Noran), as lâminas petrográficas foram recobertas com uma fina camada de ouro.

A análise das fases mineralógicas presentes nos tijolos refratários foi realizada por difração de raios X (Philips - model X'Pert MPD). Foram analisadas duas regiões do tijolo refratário *post mortem*: uma situada na interface escória/tijolo refratário e outra região correspondente ao tijolo refratário que não esteve em contato com a escória, conforme mostra a Figura 1. Desta forma, uma amostra da região do refratário que entrou em contato com a escória (indicação 1 da Figura 1b) foi separada do restante do tijolo e então realizada a análise por difração de raios-X para identificar as fases mineralógicas. Posteriormente, a região mais escura, correspondente ao tijolo refratário de MgO-C (indicação 2 da Figura 1b) também foi removida e analisada por difração de raios-X.

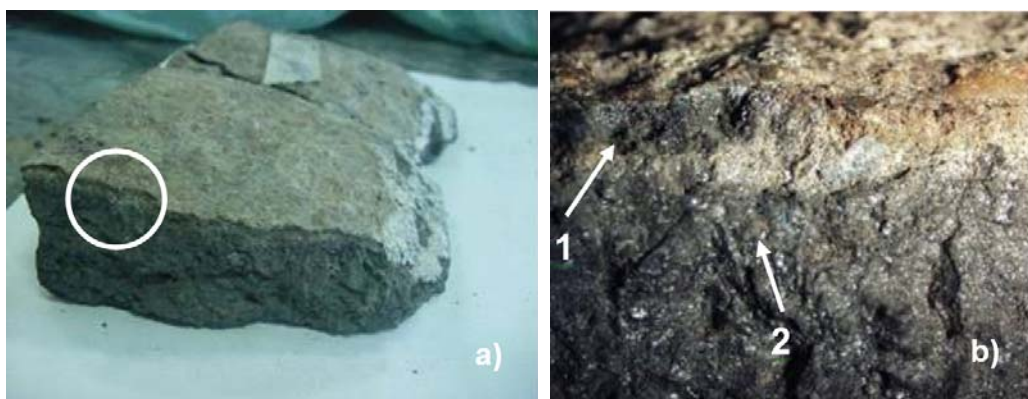


Figura 1: (a) Região de interface escória/refratário analisada com lâmina petrográfica, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura. (b) Detalhe da interface escória/refratário (indicação 1) e tijolo refratário que não entrou em contato com a escória (indicação 2).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Tijolos Refratários de Magnésia-Carbono *In Natura*

A análise por difração de raios X do tijolo de MgO-C *in natura* indica a presença das seguintes fases mineralógicas (Figura 2): espinélio ($MgAl_2O_4$), carbono (C), forsterita (Mg_2SiO_4) e periclásio (MgO).

A identificação das fases mineralógicas espinélio e forsterita pode ser justificada pela presença de antioxidantes (silício e alumínio), adicionados ao tijolo refratário de magnésia-carbono com a finalidade de evitar nas altas temperaturas de uso a reação do oxigênio com o grafite presente no tijolo refratário.

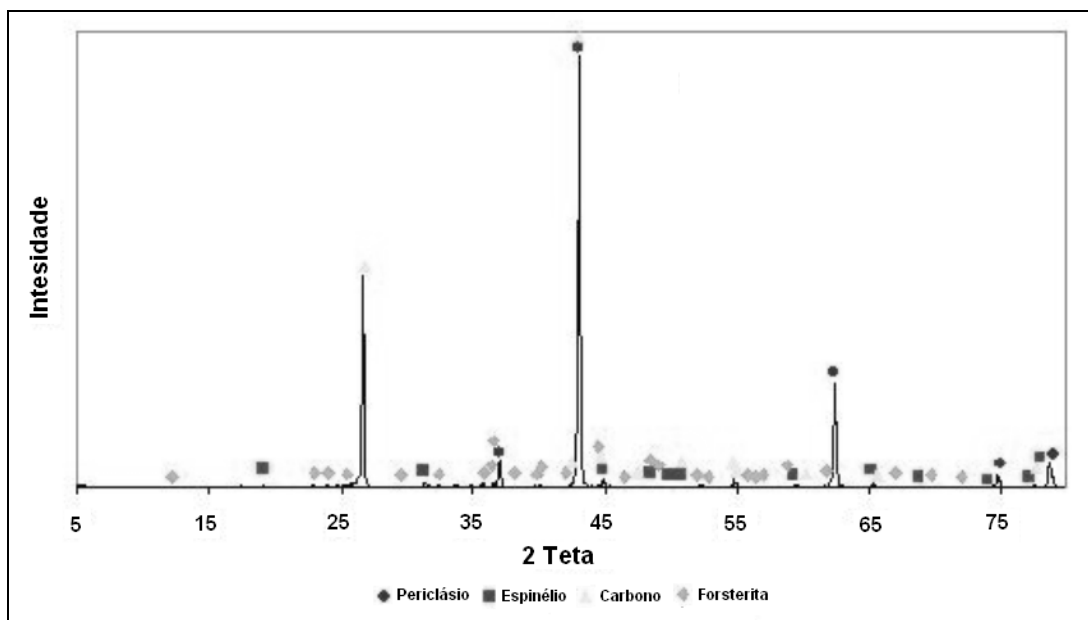


Figura 2: Análise mineralógica do tijolo refratário *in natura*.

A análise por microscopia por luz transmitida das lâminas petrográficas possibilitou identificar algumas características interessantes dos grãos de MgO presentes nos tijolos MgO-C. A Figura 3 apresenta em separado (a) e (b), respectivamente, o grão de MgO eletrofundido e o grão de MgO sinterizado. O grão na Figura 3a apresenta-se com uma superfície mais lisa, se comparado ao segundo, o que é um indicativo de um grão eletrofundido. O tamanho médio de ambos é de cerca de 1mm. O grão de MgO na Figura 3b é de um grão sinterizado, o que é sugerido pela a descontinuidade ou irregularidade da superfície.

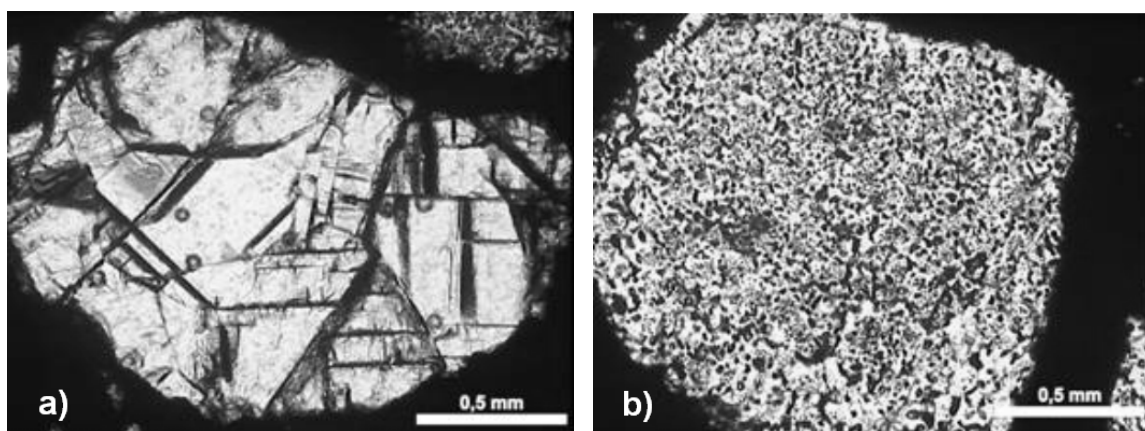


Figura 3: Detalhe dos grãos de MgO (a) eletrofundido e (b) sinterizado do tijolo refratário magnésia-carbono.

Por microscopia eletrônica de varredura, foi possível, como na análise anterior, diferenciar grãos de magnésia eletrofundidos e sinterizados, ligados à matriz por piche, como mostra a Figura 4. Na Figura 4a é possível comparar ambos os grãos justapostos indicados por 1 e 2 para, respectivamente, um grão sinterizado e outro eletrofundido. Os pontos pretos internos ao grão indicado por 1 na Figura 4a sugerem uma porosidade típica de um grão sinterizado. Já os grãos eletrofundidos (Figura 4a) podem ser bem representadas pelo grão indicado por 2, onde não é possível visualizar os pontos pretos internos ao grão, embora apresentem certa irregularidade em sua superfície, com trincamento interno (neste caso, teríamos uma partícula, exibindo trincas bem visíveis no contorno de grão).

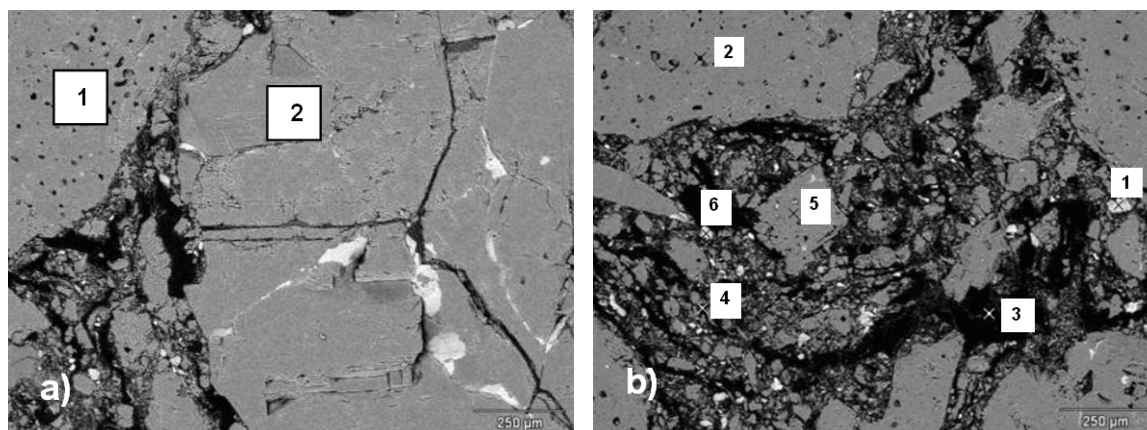


Figura 4: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de um Tijolo refratário *in natura* mostrando (a) os grãos de magnésia sinterizados (1) e grãos eletrofundidos (2). (b) distribuição dos grãos de magnésia (2-4-5) em diferentes tamanhos e presença de antioxidantes (1 e 6) na matriz de piche (3).

Na Figura 4b são indicados seis pontos para os quais foi determinada a composição química por microanálise com microsonda EDS. A Tabela 1 lista os elementos químicos identificados. Os pontos 2-4-5 da Figura 4b compreendem os grãos de magnésia, sinterizados ou eletrofundidos. Pode-se identificar nestes pontos o elemento magnésio, com traços de cálcio. Já o ponto 3 da Figura 4b se refere à matriz de piche, o que é corroborado pela identificação do elemento carbono na análise com microsonda EDS. Os pontos 1 e 6 confirmam a presença de antioxidantes nos tijolos refratários, através da identificação do elemento alumínio. O ponto 4 também apresentou significativa presença (~13,2 %) de Si.

Tabela 1: Análise pontual com microsonda EDS confirmando a composição química dos tijolos refratários de magnésia-carbono bem como a presença de antioxidantes (composição química em porcentagem de peso). Pontos de análise referentes à Figura 4.

Pontos EDS	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
1		47,1		52,9			
2		39,6	59,6			0,82	
3	100						
4		43,5	43,2		13,2		
5		39,4	58,7			0,82	1,04
6		47,1		52,9			

3.2 Tijolos Refratários de Magnésia-Carbono *Post Mortem*

A Figura 5 apresenta a análise por difração de raios X da região identificada na Figura 1a correspondente à interface escória/tijolo refratário. Para fins de comparação, a análise referente ao tijolo *in natura* foi adicionada. A partir da análise mineralógica da região selecionada, constata-se que esta é constituída basicamente por periclásio (MgO) e carbono (C), com a presença de outras fases como alumina (Al_2O_3), silicato de cálcio (Ca_2SiO_4) e gelenita ($Ca_2Al_2SiO_7$).

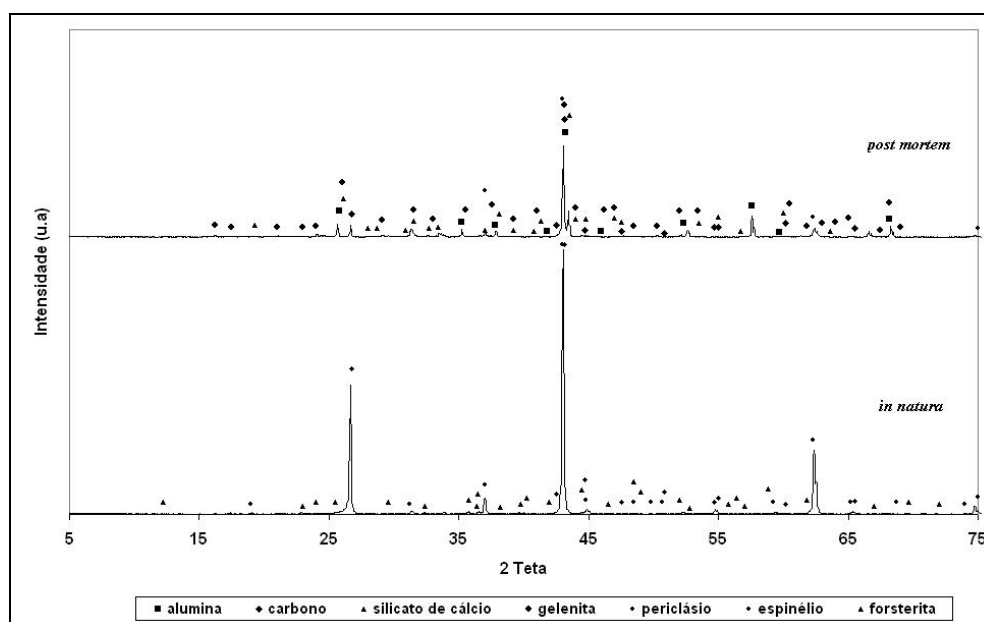


Figura 5: Análise mineralógica da região correspondente à interface escória/refratário *post mortem*. Para fins de comparação, a análise do tijolo *in natura* foi adicionada.

O difratograma do tijolo *post mortem* apresentado na Figura 5 fornece indícios que a região analisada é formada por uma mistura de fases resultante da interação entre o tijolo refratário e a escória. Comparando os difratogramas dos tijolos antes e após seu uso (Figura 5), é possível constatar duas novas fases cristalinas identificadas como silicato de cálcio (Ca_2SiO_4) e gelenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), cujos constituintes, em parte ou no todo, são originários da escória, formada basicamente por SiO_2 - CaO - Al_2O_3 - MgO .

Após a utilização dos tijolos refratários em escala industrial, é possível identificar a infiltração da escória. A imagem obtida por microscopia de luz transmitida apresentada na Figura 6 mostra a penetração no interior do tijolo refratário pela escória (região indicada na Figura 6). Após esta infiltração, ocorre o ataque da escória à matriz, o que acarreta posteriormente no destacamento dos grãos sinterizados e eletrofundidos da matriz e conseqüente degradação do tijolo refratário, como proposto por Segadães (1997) [10].

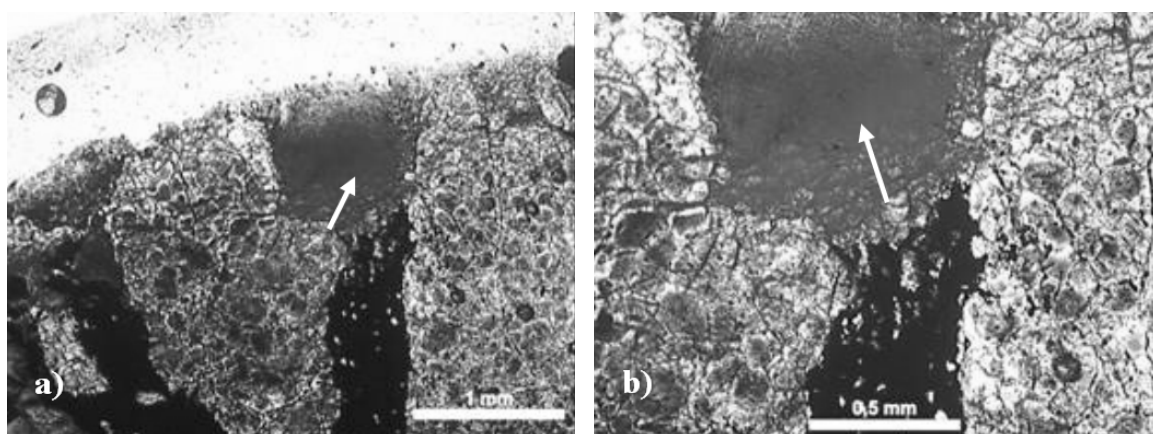


Figura 6: Imagem obtida por microscopia de luz transmitida identificando o ataque da escória (setas indicadas na figura) à matriz do tijolo refratário de magnésia-carbono.

(a) Aumento: 2,5X e (b) Aumento: 5X.

A micrografia apresentada na Figura 7, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostra a morfologia do tijolo refratário *post mortem*. É possível observar uma interface entre os grãos de MgO e a matriz mais rugosa e a matriz com indícios de significativa perda de carbono.

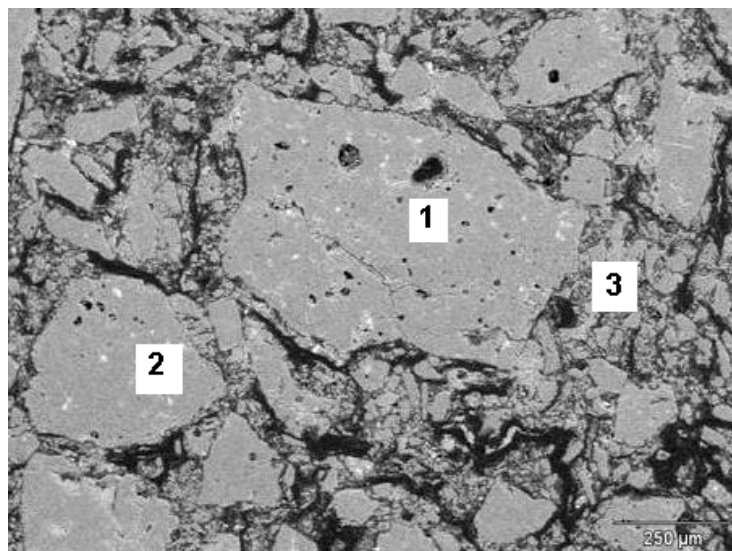


Figura 7: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de um tijolo refratário de magnésia-carbono *post mortem* em que é possível observar uma acentuada redução de carbono na matriz (3) bem como a presença dos grãos de magnésia (1 e 2).

A perda de carbono é confirmada através da análise pontual com a microsonda EDS, representada pelos pontos 1 a 3, apresentada na Tabela 2. Assim, a comparação da análise química da matriz do tijolo refratário *in natura* (ponto 3 Figura 4b) contrasta com a análise do tijolo refratário *post mortem* (ponto 3 da Figura 7), indicando uma forte redução da quantidade de carbono presente na matriz. Também se observa que não há presença de antioxidantes nos tijolos refratários após o seu uso em escala industrial.

Tabela 2: Análise por microsonda EDS dos tijolos refratários de magnésia-carbono após a sua utilização (composição química em porcentagem de peso). Pontos de análise referentes à Figura 7.

<i>Pontos de EDS</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Ca</i>	<i>Fe</i>
<i>1</i>	39,7	60,3			
<i>2</i>	39,9	56,6	1,7		1,7
<i>3</i>	42,2	38,1	12,6		7,0

A microscopia apresentada na Figura 8 refere-se ao local que compreende a interface entre o tijolo refratário e a escória. Pode-se observar claramente a penetração da escória (região mais clara) no interior do tijolo, contornando os maiores grãos de magnésia e supostamente reagindo com a matriz. Cabe salientar que co-existem em um mesmo tijolo refratário zonas que se conservam inalteradas (por exemplo, o ponto 6 da Figura 8), que contrastam com zonas completamente tomadas pela escória, inclusive com a ausência de grãos de magnésia como no caso do ponto 1 da Figura 8. Este ponto seria equivalente ao estágio III de corrosão, conforme proposto por Brosnan (2004) [3].

A análise química com a microsonda EDS apresentada na Tabela 3, relativa aos pontos 1 a 6 indicados na Figura 8, apresenta mais indícios do ataque químico da escória nos tijolos refratários.

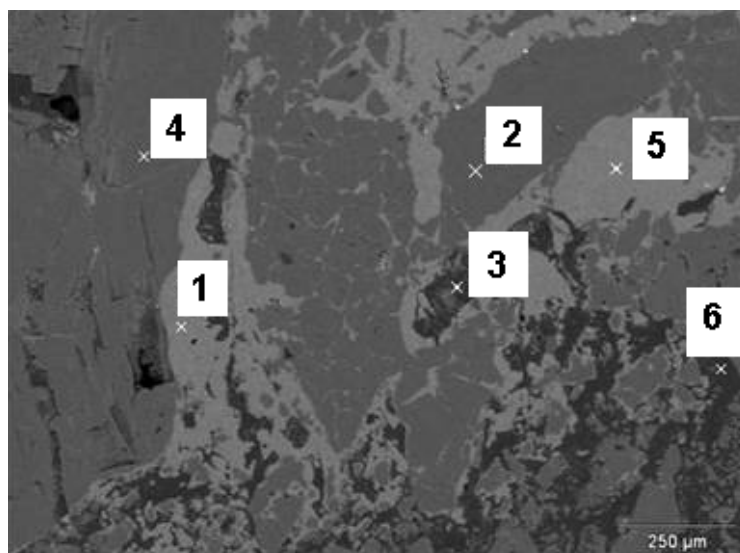


Figura 8: Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de um tijolo refratário de magnésia-carbono após a sua utilização (indicação 2, Figura 1b). Percebe-se o ataque químico da escória na matriz (1-3-5), que envolve os grãos de magnésia (2 e 4).

Tabela 3: Análise por microsonda EDS dos tijolos refratários de magnésia-carbono após a sua utilização, mostrando a presença de alumínio, sílica e cálcio associados à escória (composição química em porcentagem de peso). Pontos de análise referentes à Figura 8.

Pontos de EDS	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
1		38,8		15,3	9,3	36,6	
2		39,7	60,3				
3		43,6		14,6	18,2	8,7	14,9
4		39,7	60,3				
5		39,0	4,7	8,9	12,2	35,0	
6	97,0	2,0	1,14			0,51	

Os pontos 1-3-5 (Tabela 3) identificam a escória infiltrada na matriz, envolvendo os grãos de magnésia que são identificados pelos pontos 2-4 (Figura 8). Este ataque ocorre preferencialmente na matriz dos tijolos refratários, principalmente devido à existência de poros e trincas. JANSOON (2005) [6] também cita em seu trabalho a infiltração da escória através da porosidade existente nos tijolos refratários. Desta forma, cálcio, alumínio e silício provenientes da escória penetram através destes poros e trincas, o que faz com que os grãos de magnésia sejam posteriormente removidos dos refratários.

Como mencionado anteriormente, bem como na literatura [6, 10], a porosidade é uma das responsáveis pela infiltração da escória no tijolo refratário. Observando a caracterização dos tijolos refratários de magnésia-carbono *in natura* apresentada na Tabela 4, percebe-se certo grau de porosidade aberta, podendo esta aumentar com o decorrer do uso do tijolo em escala industrial, devido a choques térmicos [3]. Entretanto, a caracterização dos tijolos refratários após seu uso se torna complexa, visto que ocorre uma forte degradação do material que pode levar a falsos resultados de resistência mecânica, absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente. Esta degradação está associada aos complexos mecanismos de choque térmico e ataque químico da escória ao tijolo refratário. Porém, é relevante ser considerada a oxidação do carbono presente na matriz quando os tijolos refratários são submetidos a temperaturas elevadas, bem como a atmosfera oxidante, como mostrado neste trabalho. Isto contribui para o aumento da porosidade durante a vida útil dos tijolos refratários, favorecendo a infiltração da escória, intensificando-se assim o ataque químico. Portanto, por meio da avaliação das micrografias, destaca-se que os tijolos para o fim que se destinam, poderiam ter melhorados sua resistência à oxidação, seja intrínseca ao carbono (grafite utilizado), bem com ao sistema anti-oxidante. Esta assertiva baseia-se no fato dos tijolos possuírem grãos de elevada qualidade em termos de resistência à corrosão química, como é o caso dos grãos eletrofundidos.

Tabela 4: Caracterização dos tijolos refratários de magnésia-carbono *in natura*.

Parâmetro	
Resistência à compressão (MPa)	25,3
Absorção de água (%)	1,31
Porosidade aparente (%)	3,95
Densidade aparente (g/cm ³)	2,89

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos por microscopia, difração de raios X e análise com microsonda EDS indicam que o ataque químico da escória se dá preferencialmente na matriz, onde após este ataque os grãos sinterizados e eletrofundidos são removidos do tijolo refratário. Os tijolos mostram corrosão acentuada com profunda penetração da escória, envolvendo a microestrutura do tijolo, para além da face imediatamente em contato com a escória. A perda do carbono na estrutura, deixando presença de porosidade aberta e conectada na matriz, aumentou o potencial para degradação dos tijolos refratários de MgO-C. A perda de C dos tijolos em uso significa o aumento da molhabilidade dos refratários pela escória – fator primordial ao ataque químico. Este se deve ao gradiente de concentração de MgO entre tijolo e escória, gerando condições termodinâmicas favoráveis ao ataque.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] ASTM C133-97, “Standard test methods for cold crushing strength and modulus of rupture of refractories”, *ASTM – American Society for Testing and Materials*, USA, Book of Standards v. 15.01, 2003.
- [2] ASTM C20-00, “Standard test methods for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shape by boiling water”, *ASTM – American Society for Testing and Materials*, USA, Book of Standards, v. 15.01, 2005.
- [3] BROSNAN, D.A. “Corrosion of refractories”, In: *Refractories handbook*, edited by SCHACHT, C.A., Marcel Dekker Inc., New York, 2004.
- [4] ELSSNER, G., HOVEN, H., KIESSLER, G., WELLNER, P. “Ceramics and ceramic composites: materialographic preparation”, *Elsevier*, Amsterdam, 1999.
- [5] HASHEMI, B., NEMATI, Z.A., FAGHIHI-SANI M.A., “Effects of resin and graphite content on density and oxidation behavior of MgO-C refractory bricks”, *Ceramics International*, 2005.
- [6] JANSSON, S., BRABIE, V., JÖNSSON, P., “Corrosion mechanism and kinetic behaviour of MgO-C refractory material in contact with CaO-Al₂O₃-SiO₂-MgO slag”, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, v. 34, pp. 283–292, 2005.
- [7] KIENOW, S., “Refractory materials”, In: *Ceramics Monographs – A handbook of ceramics*, Verlag Schmid GmbH Freiburg i. Brg., 1979.
- [8] LANDY, R.A., “Magnesia refractories”, In: *Refractories handbook*, edited by Schacht, C.A., Marcel Dekker Inc., New York, 2004.
- [9] NANDY, S.K., GHOSH, N.K., GHOSH, G.C., “Hydration of coked MgO-C-Al refractories”, *Ceramics International*, v. 32, pp. 163–172, 2006.
- [10] SEGADÃES, A.M., *Refractários*, Universidade de Aveiro, 1997.