



# CARACTERIZAÇÃO DE TIJOLOS DE MgO-C PARA LINHA DE ESCÓRIA DE PANEAS DE AÇO<sup>1</sup>

Sávia Cristina Lacerda Poubel Bastos<sup>2</sup>  
Marco Antônio Quintela<sup>3</sup>  
Afonso Pereira Salgado<sup>4</sup>

## Resumo

Motivada por uma expectativa de progresso do desempenho do revestimento refratário para panela de aço, a partir de 2008, a Usiminas deu início a uma caracterização sistêmica de tijolos de MgO-C para a linha de escória, por meio de ensaios laboratoriais, na tentativa de melhor entender o comportamento desses materiais. Nesse contexto, são apresentados e discutidos os resultados de caracterização de três tijolos comerciais de MgO-C para essa região. A associação dos resultados laboratoriais e o desempenho industrial indicou que a análise de perda de carbono após o teste para avaliar a resistência à oxidação, juntamente com a elevada porosidade aparente e baixa resistência ao ataque por escória demonstrou ser as propriedades principais que direcionaram o menor desempenho do tijolo MC2.

**Palavras-chave:** MgO-C; Refratário; Panela.

## CHARACTERIZATION OF MgO-C BRICKS FOR THE SLAG LINE OF STEEL LADLES

## Abstract

Since 2008, Usiminas Steelworks has intensified efforts to increase the life of steel ladle lining. The main focus has been on MgO-C bricks for slag line. In this context, it was developed a laboratorial characterization schedule for three MgO-C bricks from different suppliers, in order to understand better the behavior of these materials. The current results of laboratory tests used for characterizing them are presented and discussed. The combination of the lab results and the industrial performance indicated that, the carbon loss, high apparent porosity and the low thermal shock resistance are some of the most important aspects when selecting low industrial performance for the MC2 brick.

**Key words:** MgO-C; Refractory; Ladle.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheira de Materiais, MSc; Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, MSc; Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Membro da ABM; Técnico Metalúrgico, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, verificou-se um expressivo aperfeiçoamento dos processos e práticas metalúrgicas, destacando-se o refino secundário, o que, por outro lado, acarretou em condições mais severas para os refratários, tais como: escórias mais agressivas, maior tempo de residência do aço na panela e temperaturas mais elevadas.<sup>(1)</sup>

Por vários anos, os convertedores foram os equipamentos que mais despertaram interesse na siderurgia em termos de dispêndio financeiro com refratários e disponibilidade para produção. Entretanto, com a introdução e progresso das técnicas para prolongar sua campanha e com a evolução das práticas de refino secundário dos aços, as panelas passaram a ocupar também uma posição de destaque. A partir da última década, os tijolos clássicos foram gradualmente substituídos por refratários contendo carbono, que apresentam superior resistência ao choque térmico e à corrosão por escória.<sup>(2)</sup>

Motivada por uma expectativa de progresso mais substancial nessa área, a Usiminas deu início a um conjunto de estudos de P&D para avaliar os mecanismos de desgastes de refratários para linha de escória de panelas de aço e caracterizar, de forma sistêmica, os tijolos de MgO-C disponíveis no mercado. Nesse contexto, são apresentados e discutidos os resultados de testes laboratoriais obtidos para a caracterização de tijolos comerciais de MgO-C para essa região.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os corpos-de-prova para determinação das propriedades físicas e químicas foram retirados de três tijolos comerciais de MgO-C, ligados a resina fenólica, denominados MC1, MC2 e MC3, produzidos no Brasil e China.

### 2.1 Difração de Raios-X, Análise Química e Ceramografia

As análises de fases, ceramográficas e análise química foram efetuadas em amostras coqueificadas a 500°C durante 5 horas. Foi também determinada a quantidade de carbono nas amostras antes e após o teste de oxidação.

### 2.2 Porosidade Aparente

A porosidade aparente foi determinada em corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm x 50 mm coqueificados a 1.000°C, 1.200°C e 1.400°C durante 5 horas.<sup>(3)</sup>

### 2.3 Resistência à Oxidação

O teste para avaliar a resistência à oxidação foi realizado a 1.400°C durante 30 minutos, em amostras cilíndricas (25 mm de diâmetro x 40 mm de altura) coqueificadas nessa temperatura durante 5 horas. O grau de oxidação foi determinado pela relação entre o carbono final e o carbono inicial.<sup>(4)</sup>



## 2.4 Resistência à Flexão a Quente

A resistência à flexão a quente foi medida nas temperaturas de 1.000°C, 1.200°C e 1.400°C, em atmosfera de nitrogênio, após patamar de 30 minutos na temperatura de ensaio. Os testes foram realizados em corpos-de-prova nas dimensões de 25 mm x 25 mm x 150 mm coqueificados previamente a 500°C durante 5 horas. <sup>(5)</sup>

## 2.5 Resistência ao Dano por Choque Térmico

O teste foi efetuado em forno a indução utilizando-se corpos-de-prova de 40 mm x 40 mm x 160 mm e consistiu em imergir cerca de 50% do seu comprimento em metal líquido a 1.560°C durante 1 minuto. <sup>(6)</sup> Em seguida, o corpo-de-prova foi resfriado em nitrogênio durante 10 minutos. A resistência ao dano por choque térmico foi inferida por meio da quantidade de trincas formadas na seção longitudinal dos corpos-de-prova.

## 2.6 Resistência ao Ataque por Escória

A resistência ao ataque por escória foi avaliada através de testes efetuados em forno rotativo, envolvendo corpos-de-prova de seção trapezoidal nas dimensões de (88 mm; 68 mm) x 30 mm x 190 mm, cujo arranjo produz uma figura de seção poligonal. O teste foi efetuado entre 1.500°C e 1.550°C, utilizando-se escória típica de panela.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Difração de Raios-X, Análise Química e Ceramografia

A combinação dos resultados de difração de raios-X (Tabela 1), análises ceramográficas (Figura 1) e análises químicas (Tabela 2) indicou que todos os tijolos avaliados contêm alumínio metálico como antioxidante. Corroborando os resultados de análises químicas, as fotomicrografias dos tijolos indicaram que o refratário MC2 contém maior quantidade de antioxidante (Figura 1). Adicionalmente, não foi observada a presença de outros tipos de antioxidantes nos refratários estudados, tais como Si ou ligas metálicas. Foi, também, verificada a presença de grãos de MgO de baixa densidade em maior proporção no tijolo MC2.

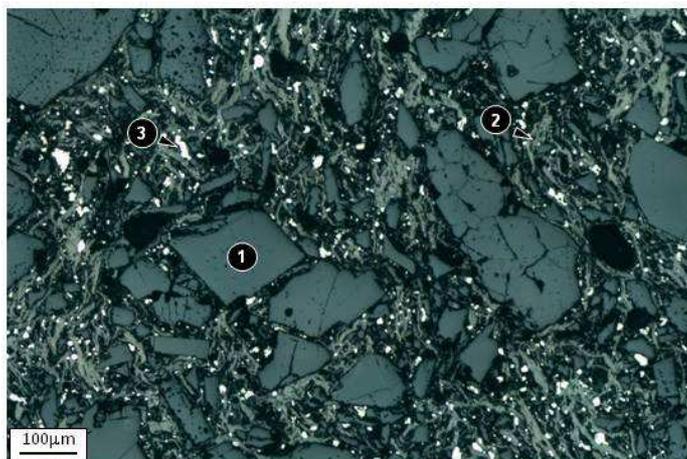
**Tabela 1.** Composição de fases dos tijolos refratários

Denominação	MC1	MC2	MC3
MgO	F	F	F
C	F	F	F
Al	F	F	F

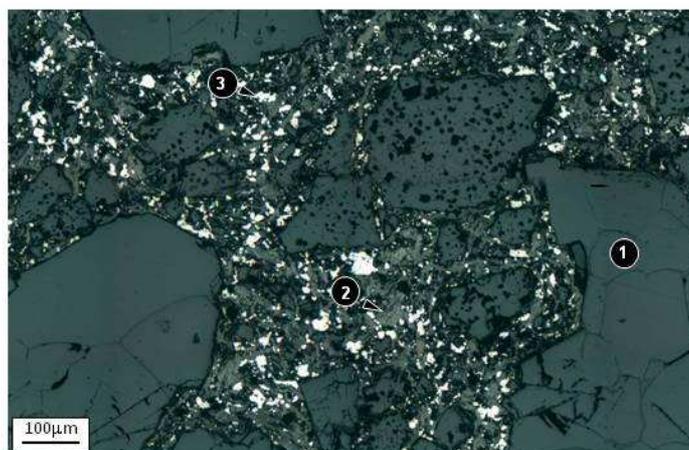
F = fase presente

**Tabela 2.** Análise química de alumínio dos tijolos refratários

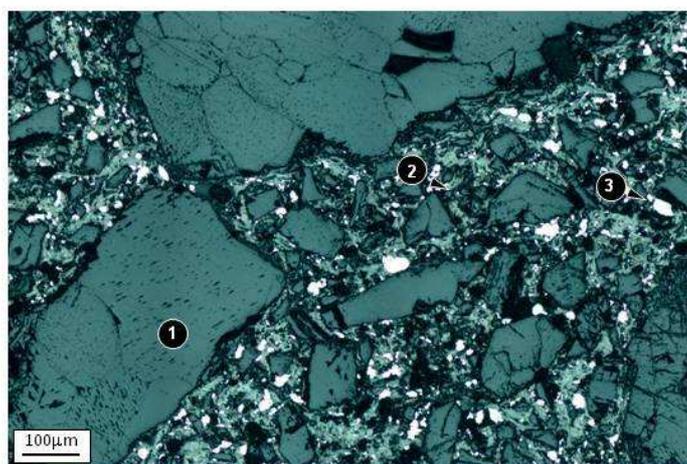
Denominação	Alumínio (%)
MC1	2,20
MC2	5,66
MC3	2,47



MC1



MC2



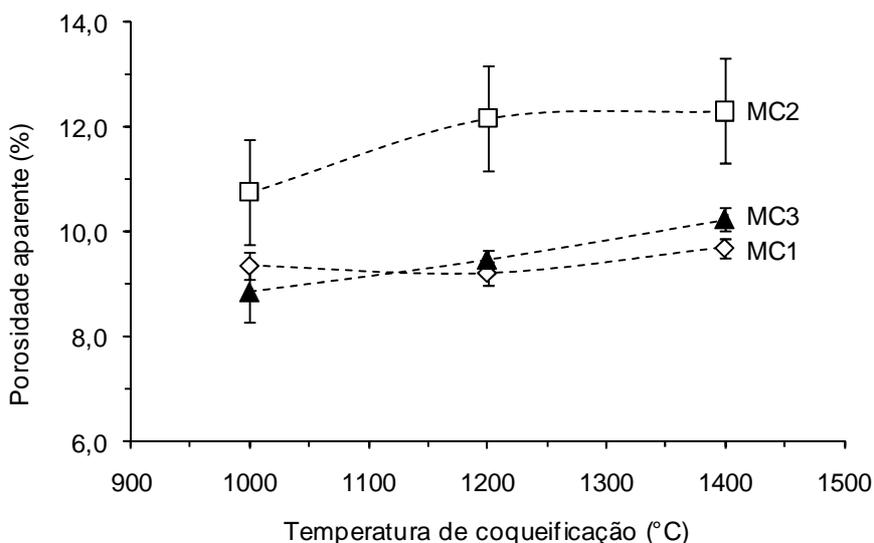
MC3

**Figura 1.** Fotomicrografias dos tijolos MC1, MC2 e MC3: MgO (1), grafita (2) e Al (3).



### 3.2 Porosidade Aparente

Os resultados dos testes indicaram que houve uma tendência de aumento da porosidade aparente com a temperatura de coqueificação para os tijolos MC2 e MC3 (Figura 2). Entretanto, este comportamento não foi observado para o tijolo MC1. Destaca-se também a maior porosidade aparente para o tijolo MC2 para quaisquer temperaturas estudadas, assim como maior dispersão dos resultados.



**Figura 2.** Comportamento da porosidade aparente em função da temperatura de coqueificação dos corpos-de-prova.

### 3.3 Resistência à Oxidação

A combinação do grau de oxidação (g.o.) com a perda de carbono a 1.400°C (Tabela 3) propiciou uma análise mais completa do comportamento da resistência à oxidação.

**Tabela 3.** Perda de carbono e grau de oxidação (g.o.)

Denominação	$C_{(inicial)}$	Perda de $C_{(1400\text{ °C})}$	$g.o. (1400\text{ °C})$
		(%)	
MC1	12,1	9,5	79
MC2	14,0	10,6	76
MC3	10,6	8,5	80

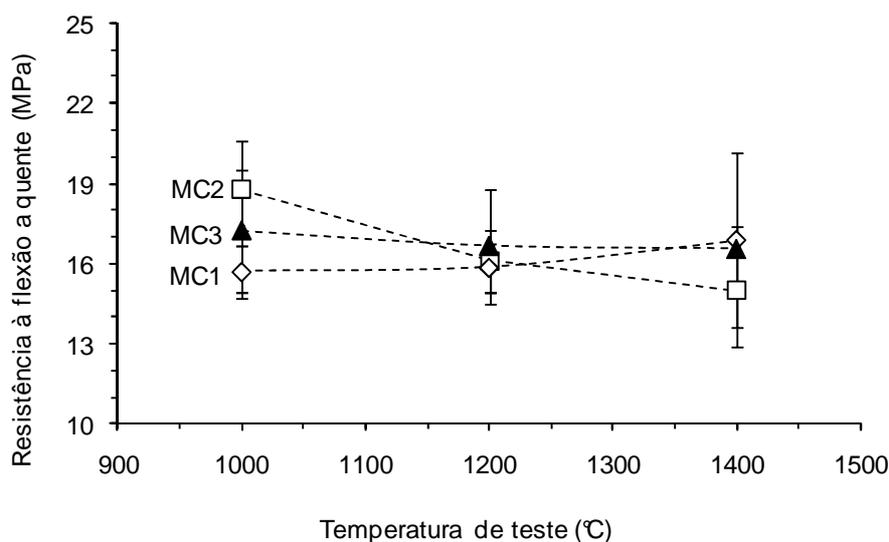
Os resultados dos testes indicaram que os tijolos apresentaram grau de oxidação semelhante. Por esta razão, o tijolo que contém maior quantidade de carbono (MC2) apresentou maior perda de carbono. Como a permeabilidade afeta diretamente a resistência à oxidação,<sup>(7)</sup> uma alternativa para reduzir a perda de carbono do tijolo MC2 e, desta forma, aumentar sua resistência à oxidação seria reduzir sua porosidade aparente. Esta abordagem permitira também ajustar a quantidade de antioxidante deste tijolo, ou seja, reduzir a concentração de Al, o que potencializaria ganhos importantes



em termo de reduzir a rigidez estrutural e aumentar a resistência à corrosão por escória.

### 3.4 Resistência à Flexão a Quente

A Figura 3 mostra os resultados do ensaio para avaliar a resistência à flexão a 1.000°C, 1.200°C e 1.400°C. Os valores de resistência indicam que não houve variação significativa da resistência mecânica para os tijolos MC1 e MC3 na faixa entre 1.000°C e 1.400°C. Já o tijolo MC2 apresentou queda na resistência à flexão a quente em função da temperatura de teste. Apesar da superior porosidade aparente após coqueificação do tijolo MC2, sua resistência à flexão média a 1.000°C foi maior que a dos demais tijolos. Já nas temperaturas de 1.200°C e 1.400°C houve considerável redução nos valores médios de resistência à flexão. Este comportamento foi atribuído, em parte, à maior quantidade de antioxidante metálico, que compensaria sua superior porosidade aparente, mas não seria suficiente para manter a refratariedade do sistema similarmente aos outros tijolos (MC1 e MC3).

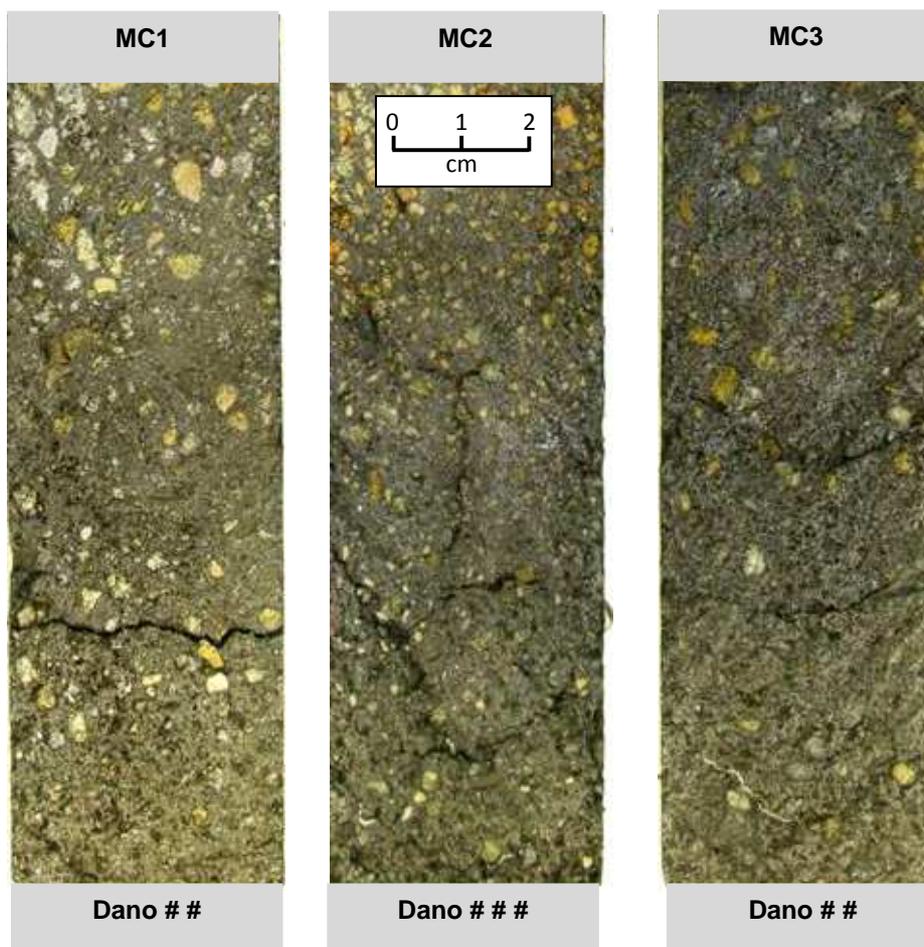


**Figura 3.** Resistência à flexão a quente em função da temperatura de teste.

Embora seja desejável alta resistência mecânica para refratários sujeitos a condições severas de erosão, elevados valores desta propriedade podem implicar, por outro lado, em efeitos negativos na resistência ao dano por choque térmico. Com isto, é importante que haja um compromisso entre a resistência mecânica e a resistência ao dano por choque térmico.

### 3.5 Resistência ao dano por choque térmico

A figura 4 apresenta uma fotografia das seções longitudinais dos corpos-de-prova após teste de choque térmico, evidenciando as trincas formadas durante a ciclagem térmica.

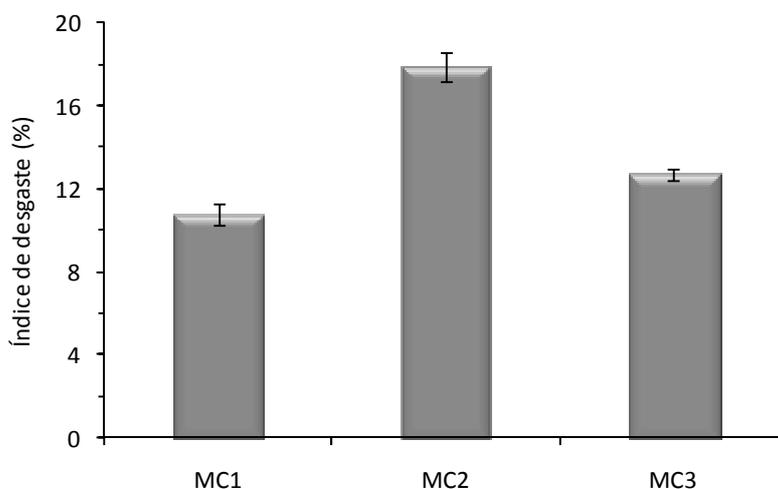


**Figura 4.** Seção longitudinal dos corpos-de-prova após teste de choque térmico em forno a indução (3 ciclos térmicos: metal líquido 1.560°C durante 60 s ↔ fluxo de nitrogênio durante 10 minutos).

Conforme a fotografia (Figura 4) o dano por choque térmico nos tijolos avaliados foi relativamente severo, isso é, os tijolos apresentaram alta densidade de trincas. Entretanto, o tijolo MC2, que contém maior quantidade de antioxidante metálico, apresentou menor resistência a ciclagem térmicas múltiplas.

### 3.6 Resistência ao Ataque por Escória

A Figura 5 apresenta os resultados do teste para avaliar a resistência ao ataque por escória. Especialmente, foram efetuados três ciclos distintos de aquecimento e resfriamento natural do conjunto de corpos-de-prova.

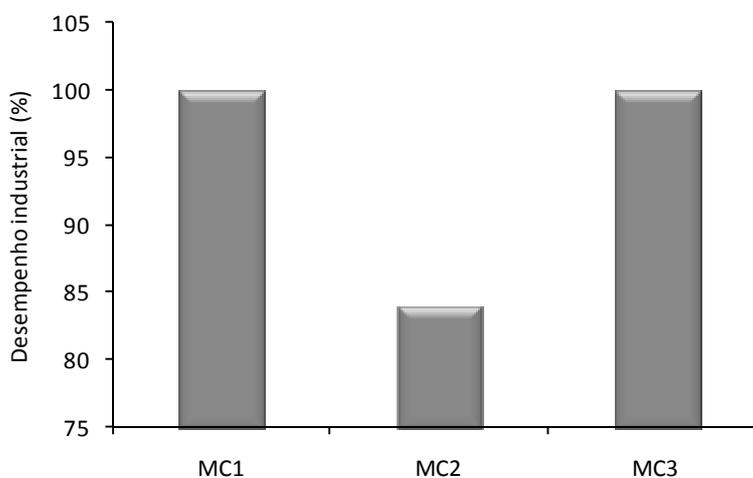


**Figura 5.** Índice de desgaste dos corpos-de-prova após teste de ataque por escória em forno rotativo.

Os resultados indicaram que o tijolo MC2 apresentou maior índice de desgaste. Já os tijolos MC1 e MC2 exibiram desgaste semelhante. Por sua vez, o maior índice de desgaste do tijolo MC2 concorda com sua maior porosidade aparente após coqueificação e sua superior perda de carbono no teste de oxidação.

#### 4 RESULTADOS INDUSTRIAIS

Assumindo-se como indicador de desempenho a vida média dos revestimentos refratários de painéis de aço, considerando o período em que ocorreram revestimentos dos três materiais avaliados em escala laboratorial, este pode ser visualizado na Figura 6. O desempenho industrial dos materiais MC1 e MC3 foram semelhantes, portanto, este foi considerado na análise como sendo 100% e, dessa forma, o desempenho do material MC2 foi obtido de forma comparativa aos materiais MC1 e MC3.



**Figura 6.** Desempenho industrial de revestimentos refratários dos materiais MC1, MC2 e MC3.



Os resultados apresentados na Figura 6 reforçam o comportamento observado durante a caracterização laboratorial dos tijolos MC1, MC2 e MC3. Quando se considerou o conjunto de propriedades tradicionalmente medidas em laboratório para esta classe de materiais, ou seja, tijolos refratários do sistema MgO-C, tais como resistência à oxidação, resistência ao ataque por escória e ao dano por choque térmico, havia fortes indicativos de que os tijolos MC1 e MC3 proporcionassem desempenho mais satisfatório, em escala industrial, em relação ao tijolo MC2, diante do melhor compromisso entre as propriedades físicas e químicas que estes apresentaram. Além disso, vale ressaltar que, de um modo geral, os resultados dos testes laboratoriais desses materiais foram ligeiramente similares e, analisando seus desempenhos industriais, estes confirmaram os resultados obtidos. Já para o tijolo MC2, os resultados laboratoriais apontaram propriedades inferiores em relação aos demais tijolos, concomitantemente, seu desempenho industrial foi cerca de 16% menor.

Tais análises indicaram que, para os tijolos estudados e para as condições operacionais vigentes, a análise de perda de carbono após o teste para avaliar a resistência à oxidação, juntamente com a elevada porosidade aparente e baixa resistência ao ataque por escória demonstrou ser as propriedades principais que direcionaram o menor desempenho do tijolo MC2.

## 5 CONCLUSÕES

Para as condições estudadas, embora os tijolos MC1, MC2 e MC3 tenham apresentado grau de oxidação semelhante, o tijolo MC2 exibiu maior perda de carbono, em virtude da sua maior quantidade de carbono inicial. Embora possua maior quantidade de antioxidantes, o tijolo MC2 apresentou superior porosidade aberta após coqueificação, o que, certamente, concorreu para sua maior perda de carbono. Com relação à resistência ao choque térmico, os tijolos MC1 e MC3 apresentaram desempenho semelhante. Já a maior densidade de trincas para o tijolo MC2 concorda com sua elevada quantidade de antioxidante, o que potencializa maior rigidez para o sistema. Por sua vez, houve indicativos de que a resistência à corrosão tenha sido significativamente afetada pela resistência à oxidação, ou seja, o tijolo MC2, que apresentou maior perda de carbono e, conseqüentemente, maior molhabilidade e porosidade final, foi aquele que exibiu maior índice de desgaste no ensaio de ataque por escória em forno rotativo.

De um modo geral, os tijolos MC1 e MC3 foram aqueles que apresentaram melhor compromisso entre as propriedades físicas e químicas, ou seja, elevada resistência à flexão a quente, resistência à oxidação e resistência à corrosão por escória, embora tenham apresentado baixa resistência ao dano por choque térmico. Portanto, a combinação destes resultados sugere melhoria da resistência à propagação de trincas, principalmente para os tijolos MC1 e MC3, sem afetar negativamente suas outras características. Adicionalmente, a análise do desempenho industrial destes materiais indicou que os testes para caracterização em escala laboratorial simularam as condições operacionais, mesmo que em ensaios separados, onde ao analisá-los conjuntamente tornou-se uma ferramenta potencial neste sentido.



## REFERÊNCIAS

- 1 TASSOT, P.; ETIENNE, F.; WANG, J.; ATKINSON, P. New concepts for steel ladle linings. In.: UNIFIED INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 2007, Biennial Worldwide Congress, 10, 2007, UNITECR'07, 2007, Berlin. Proceedings of Berlin: Alafar, 2007. CD-ROM.
- 2 QUINTELA, M. A.; PESSOA, C. A.; RODRIGUES, J. A.; PANDOLFELLI, V. C. Evolução do revestimento refratário para painéis de aço da Usiminas. *Metalurgia & Materiais*, v. 59 n. 532, 2003, p. 201-204.
- 3 ABNT. *NBR6220* - Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção de densidade aparente da parte sólida. Rio de Janeiro: 1997.
- 4 QUINTELA, M. A.; PESSOA, C. A.; RODRIGUES, J. A.; PANDOLFELLI, V. C. A novel methodology for evaluating the oxidation resistance of carbon-containing refractories. *Refractories Applications and News*, v. 7 n. 1, 2002, p. 16-19.
- 5 ABNT. *NBR 9642* - Determinação da resistência à flexão a quente. Rio de Janeiro: 1999.
- 6 ICHIKAWA, K.; ITOH, K.; SAITO, K.; HOSHIYAMA, Y. Thermal spalling test of MgO-C bricks. *Taikabutsu Overseas*, v. 13, n. 1, p. 21-26, 1993.
- 7 YAMAGUCHI, A.; KUN, Y. J. Formation and expansion of open pore in carbon-containing refractories and their prevention. *Taikabutsu Overseas*, v. 14, n. 1, p. 20-25, 1994.