

# SELEÇÃO DE CONCRETOS REFRAATÓRIOS PARA REVESTIMENTO DE ALGARAVIZ DE ALTO-FORNO<sup>1</sup>

João Filipe Cavalcanti Leal<sup>2</sup>  
Sávia Cristina Lacerda Poubel Bastos<sup>3</sup>  
Marco Antônio Quintela<sup>4</sup>

## Resumo

O presente trabalho propõe-se apresentar e discutir a metodologia empregada na Usiminas para seleção de três concretos refratários destinados ao revestimento de algaraviz de alto-forno. O objetivo principal é estimular e auxiliar os fabricantes de refratários para o desenvolvimento de materiais com propriedades especiais para fazer frente às variáveis de processos e práticas metalúrgicas vigentes na Empresa. Os resultados dos testes laboratoriais indicaram que o concreto MC2, contendo baixo teor de cimento (1,4% de CaO), apresentou melhor desempenho. A metodologia empregada foi eficiente para diferenciar os concretos refratários para algaraviz, podendo contribuir não só para a seleção como, também, para o desenvolvimento de novos produtos.

**Palavras-chave:** Algaraviz; Alto-forno; Concreto.

## SELECTION OF REFRACTORIES CASTABLES FOR TUYERE STOCK LININGS

### Abstract

This paper presents and discusses a methodology developed at Usiminas for selection of three refractories castables for tuyere stock. The approach aimed to simulate and predict the behavior of castables which should be a valuable tool on selecting suitable castables and encouraging the refractory industry for the development of special materials. The laboratory evaluation indicated that MC2 (low cement castables) shows better performance than MC1 and MC3.

**Key words:** Tuyere stock; Blast furnace; Castables.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 10º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 22 a 26 de novembro de 2009, Ouro Preto, MG.

<sup>2</sup> Membro da ABM; Técnico Metalúrgico, Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

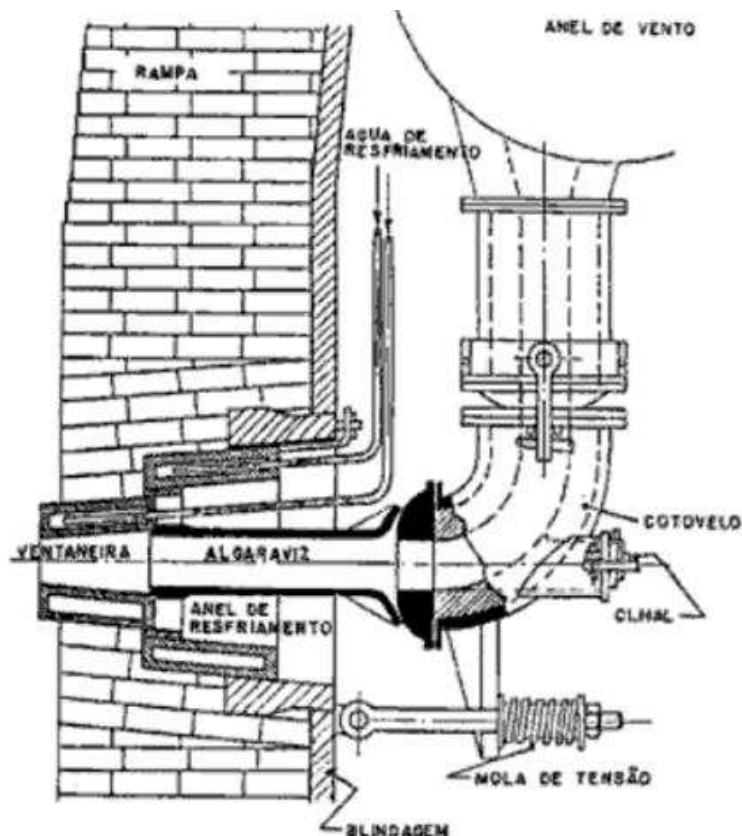
<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheira de Materiais, MSc; Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, MSc; Superintendência do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas; Ipatinga, MG.

## 1 INTRODUÇÃO

Os algaravizes dos altos-fornos na Usiminas são revestidos com concretos refratários. As condições operacionais dos algaravizes resultam numa combinação de solicitações de natureza térmica e mecânica sobre o revestimento. Dessa forma, o material destinado ao revestimento de algaraviz deve apresentar propriedades tais como: baixa condutividade térmica, alta resistência ao choque térmico e resistência à abrasão pelos sólidos em suspensão no ar quente soprado dos regeneradores.<sup>(1)</sup>

O ar quente utilizado para alimentar a combustão do coque, no interior do alto forno, é introduzido sob pressão de até 3 atm através do tubo de ligação (em pescoço de cisne) que une a ventaneira ao anel de vento. Esta ligação é constituída de três peças: o algaraviz, o cotovelo e tubo superior de ligação (Figura 1).<sup>(2)</sup>



**Figura 1.** Desenho esquemático evidenciando o arranjo de uma ventaneira.

De acordo com Araújo,<sup>(2)</sup> o algaraviz era inicialmente constituído de ferro fundido (suficiente para temperaturas de sopro até 700°C). Com o aumento da temperatura de sopro, passou-se a usar aços resistentes ao calor revestidos com material refratário. Sua extremidade se ajusta perfeitamente (em calota esférica) com a base da ventaneira. O cotovelo era pressionado por um tirante e uma mola, ligados à carcaça do forno, contra o algaraviz. Recentemente, usa-se uma junta de dilatação em forma de sanfona flexível. Possui também um ponto de inspeção, através do qual se pode introduzir uma barra de aço para limpeza da ventaneira. O tubo superior e o cotovelo também são revestidos de material refratário, para evitar perdas de calor do ar aquecido. A lança para injetar combustível (finos de carvão) atravessa a parede do algaraviz, o que de certa forma, intensifica a solicitação de resistência mecânica exercida sobre o material refratário. Além disso, o formato tronco cônico dos algaravizes pode favorecer a concentração de tensão na região

em contato com a base da ventaneira, levando ao surgimento de trincas no revestimento refratário. Conseqüentemente, ocorre o aumento na temperatura da carcaça do algaraviz culminando com a sua falha através da fluência do aço.<sup>(1)</sup>

Com o intuito de melhor entender o comportamento dos concretos refratários de algaraviz de alto-forno e definir critérios para sua seleção, a Usiminas diversificou os seus fornecedores e deu início a uma caracterização sistêmica destes materiais. Nesse contexto, são apresentadas e discutidas a metodologia e os resultados de testes laboratoriais destinados à caracterização de três concretos refratários para revestimento de algaraviz de alto-forno.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os corpos-de-prova para determinação das principais propriedades físicas foram moldados conforme as recomendações da ficha de dados técnicos dos concretos. Foram caracterizados três concretos refratários comerciais, denominados MC1, MC2 e MC3, sendo o MC1 concreto convencional e os demais concretos de baixo cimento. Os corpos-de-prova foram previamente secos a 110°C durante 24 horas e queimados a 800°C e 1.200°C durante 5 horas .

### 2.1 Composição Química

A composição química dos concretos é apresentada de acordo com a especificação da ficha de dados técnicos de cada material (Tabela 1).

**Tabela 1.** Composição química dos concretos avaliados

Denominação	Composição química (%)		
	MC1	MC2	MC3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	73,0	80,5	71,0
SiO <sub>2</sub>	15,0	13,0	22,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3	1,5	1,9
CaO	9,0	1,4	1,8
TiO <sub>2</sub>	-	1,8	2,0

### 2.2 Massa Específica e Porosidade Aparente

A massa específica aparente e a porosidade aparente foram determinadas em corpos-de-prova cúbicos de 50 mm de aresta.<sup>(3)</sup>

### 2.3 Variação Linear Dimensional

O comportamento dimensional dos concretos decorrente de tratamento térmico foi avaliado utilizando corpos-de-prova prismáticos (40 mm x 40 mm x 160 mm).<sup>(4)</sup>

### 2.4 Resistência à Flexão a Temperatura Ambiente

O teste para determinar a resistência à flexão a temperatura ambiente foi efetuado empregando corpos-de-prova prismáticos nas dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm.<sup>(5)</sup>

## 2.5 Resistência à Flexão a Quente

A resistência à flexão foi medida nas temperaturas de 800°C e 1.200°C com patamar de 30 minutos. O teste foi efetuado em corpos-de-prova prismáticos, nas dimensões de 25 mm x 25 mm x 150 mm.<sup>(6)</sup>

## 2.6 Resistência ao Choque Térmico

O ensaio para avaliar a resistência ao choque térmico foi realizado em forno *box* tradicional (Figura 2.a). As amostras foram previamente queimadas a 1.200°C durante 5 horas. Inicialmente, os corpos-de-prova foram aquecidos numa taxa de 5°C/minutos até a temperatura de 1.000°C (Figura 3) . Em seguida, foram efetuados cinco ciclos de resfriamento e aquecimento. O resfriamento súbito foi promovido por fluxo de ar durante 30 minutos (Figura 2.b). Após resfriamento, os corpos-de-prova foram novamente inseridos no forno a 1.000°C e mantidos nesta temperatura durante 30 minutos.

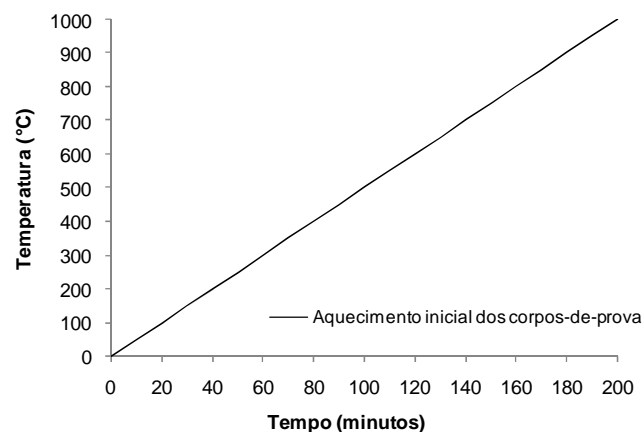


(2.a)



(2.b)

**Figura 2.** Fotografias dos equipamentos utilizados para o teste de choque térmico: forno *box* (2.a) e sistema para refrigeração forçada dos corpos-de-prova (2.b).



**Figura 3.** Rampa de aquecimento inicial dos corpos-de-prova.

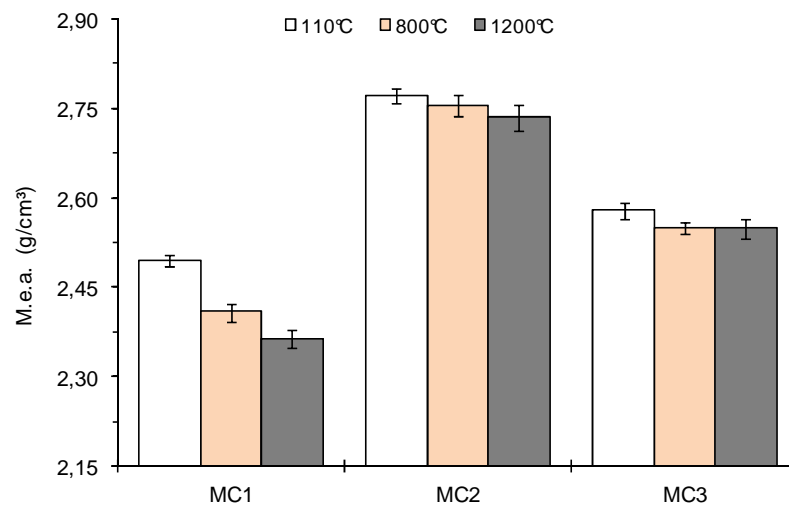
## 2.7 Resistência à Abrasão

A resistência à abrasão dos concretos foi avaliada por meio de metodologia desenvolvida na Usiminas. O experimento consistiu em inserir corpos-de-prova cúbicos de 50 mm de aresta num moinho de bola, mantendo o sistema em rotação constante durante 90 minutos.

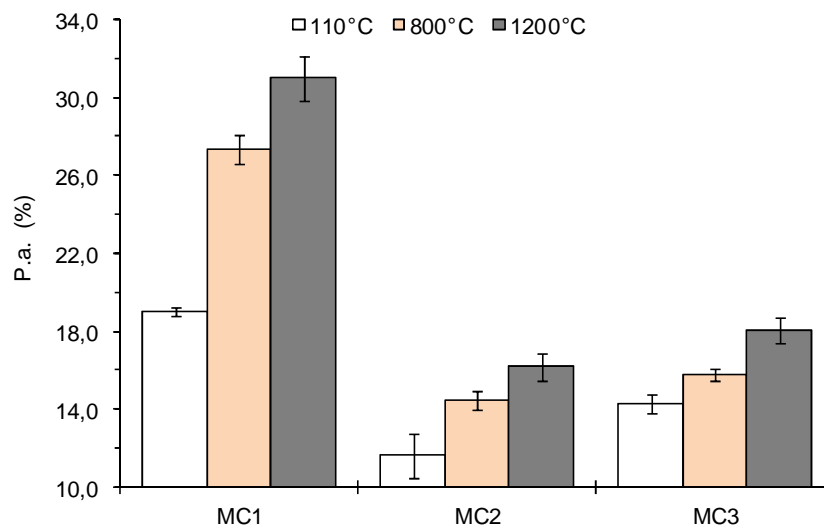
## 3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 3.1 Massa Específica E Porosidade Aparente

As Figuras 4 e 5 mostram o comportamento da massa específica aparente (M.e.a.) e porosidade aparente (P.a.) dos concretos refratários MC1, MC2 e MC3 em função da temperatura de tratamento térmico dos corpos-de-prova, respectivamente.



**Figura 4.** Comportamento da massa específica aparente (M.e.a.) de corpos-de-prova secos a 110°C durante 24 horas e queimados a 800°C e 1200°C durante 5 horas ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

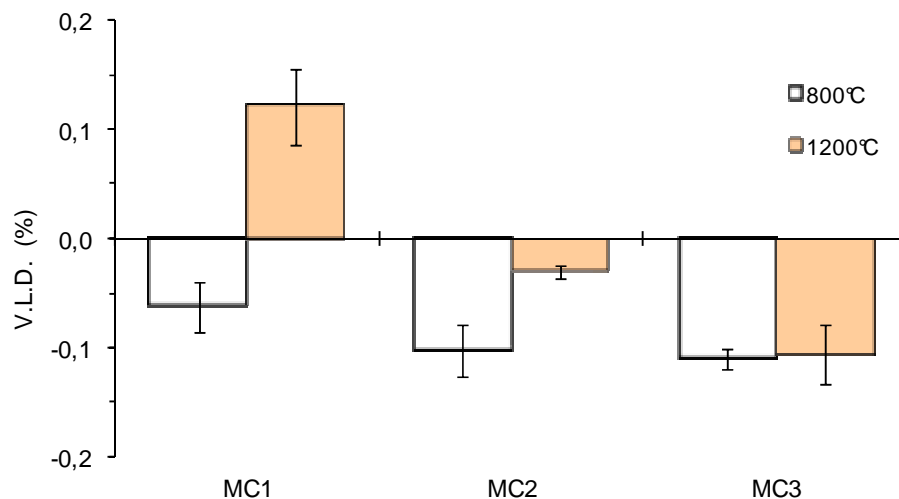


**Figura 5.** Comportamento da porosidade aparente (p.a.) de corpos-de-prova secos a 110°C durante 24 horas e queimados a 800°C e 1200°C durante 5 horas ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

Os concretos MC2 e MC3 apresentaram, nessa ordem, menor porosidade aparente para quaisquer temperaturas avaliadas (110°C, 800°C e 1.200°C). Presume-se que a menor quantidade de poros esteja associada ao baixo teor de cimento presente na composição desses concretos, uma vez que o incremento de cimento na formulação demanda uma maior quantidade de água. Durante as etapas de cura, secagem e queima dos materiais parte da umidade processada é liberada, o que implica na formação de espaços vazios (poros) ao longo da peça moldada.

### 3.2 Variação Linear Dimensional (V.L.D.)

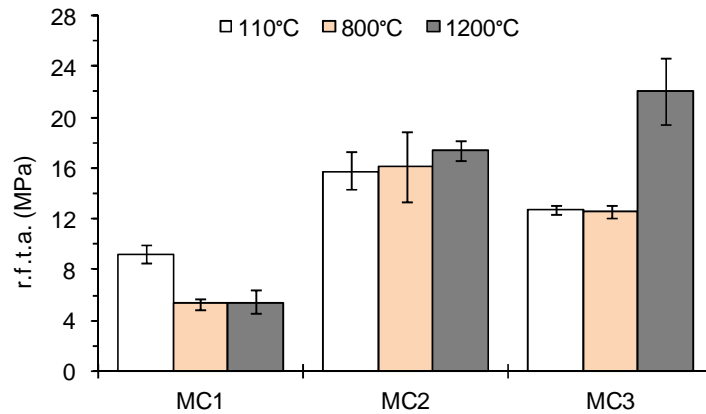
A análise do comportamento dimensional dos concretos MC1, MC2 e MC3 pode ser visualizada na Figura 6. De uma forma geral, os concretos MC1, MC2 e MC3 apresentaram retração após queima a 800°C durante 5 horas. Com relação aos corpos-de-prova queimados a 1.200°C durante 5 horas, o concreto MC2 apresentou maior estabilidade volumétrica. Já os concretos MC1 e MC3 exibiram, respectivamente, expansão e retração após exposição a essa condição térmica.



**Figura 6.** Variação linear dimensional (V.L.D.) de corpos-de-prova após queima a 800 °C e 1.200°C durante 5 horas ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

### 3.3 Resistência à Flexão a Temperatura Ambiente

Com relação à resistência à flexão a temperatura ambiente (Figura 7), o concreto MC2 apresentou valores superiores para corpos-de-prova secos a 110°C durante 24 horas e queimados a 800°C durante 5 horas. O concreto MC3 exibiu maior resistência mecânica após queima a 1.200°C durante 5 horas.

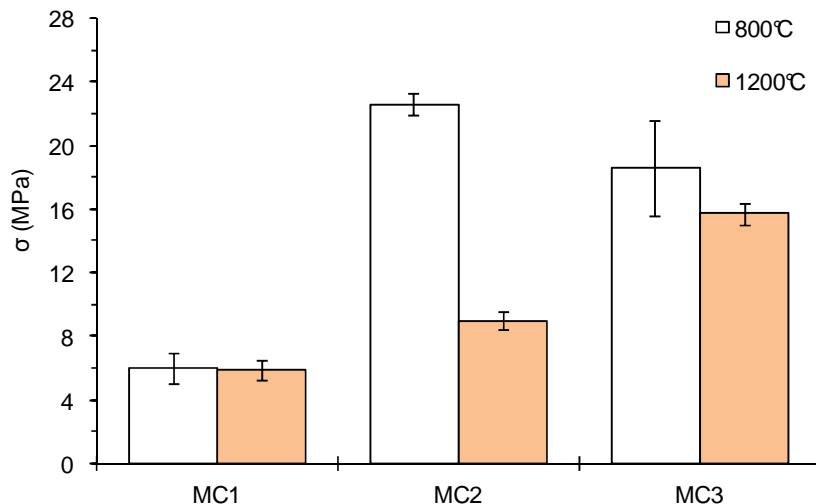


**Figura 7.** Resistência à flexão a temperatura ambiente (r.f.t.a.) de corpos-de-prova secos a 110°C durante 24 horas e queimados a 800°C e 1.200°C durante 5 horas ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

### 3.4 Resistência à Flexão a Quente ( $\sigma$ )

A Figura 8 mostra o comportamento da resistência à flexão em função da temperatura de tratamento térmico dos corpos-de-prova. Presume-se que a redução da resistência mecânica a altas temperaturas decorra em parte da presença de  $\text{SiO}_2$ , especialmente microssilica e  $\text{CaO}$ , contido no cimento de aluminato de cálcio, que reagem formando fases de baixa refratariedade, tais como anortita ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) e guelenita ( $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ).<sup>(7)</sup>

Embora a alta resistência mecânica seja desejável para refratários sujeitos a condições severas de erosão, os elevados valores desta propriedade (MC3) podem afetar substancialmente a resistência ao dano por choque térmico, conforme será discutido posteriormente.



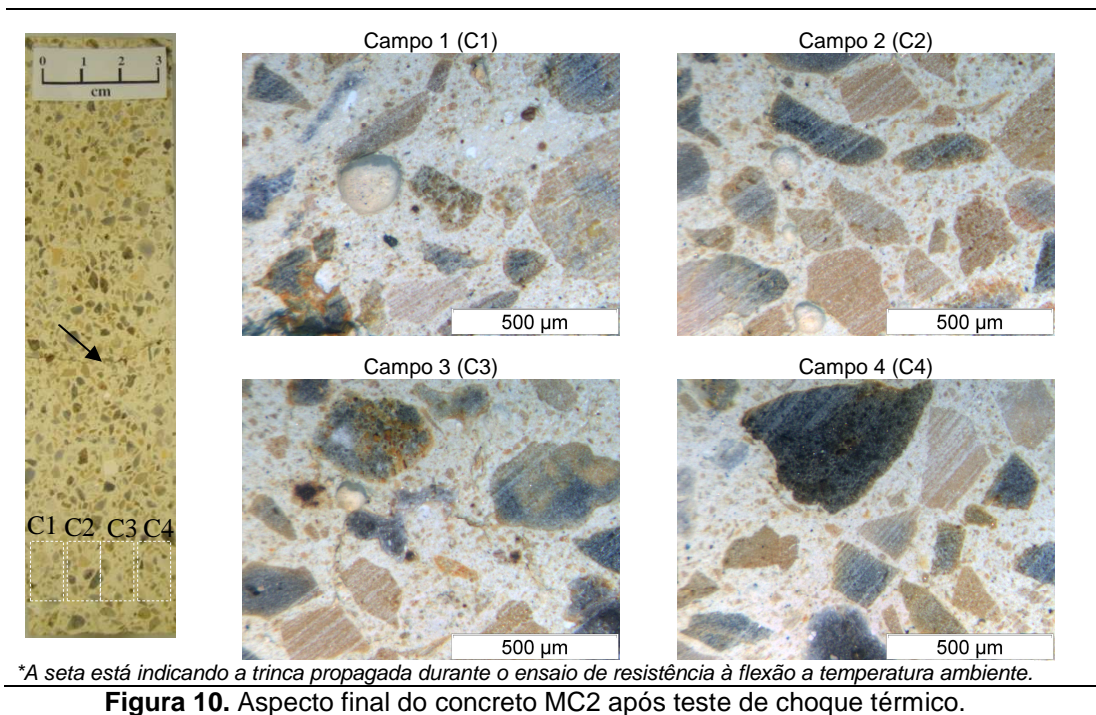
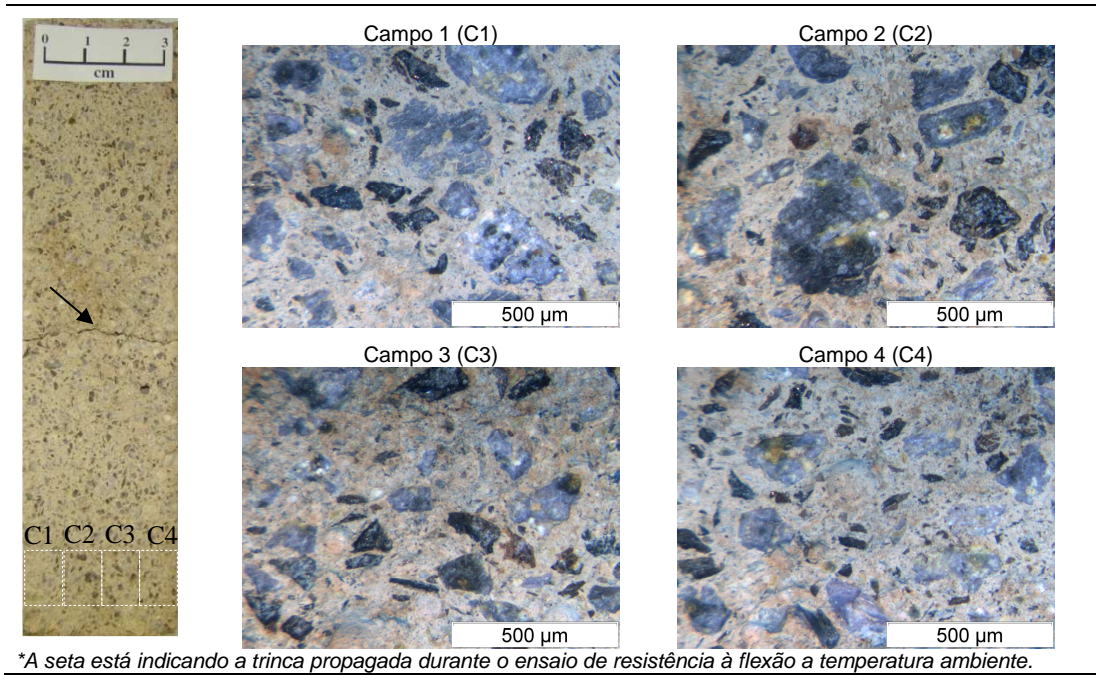
**Figura 8.** Resistência à flexão a 800°C e 1200°C de corpos-de-prova queimados nas respectivas temperaturas de teste durante 5 horas ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

### 3.5 Resistência ao Choque Térmico

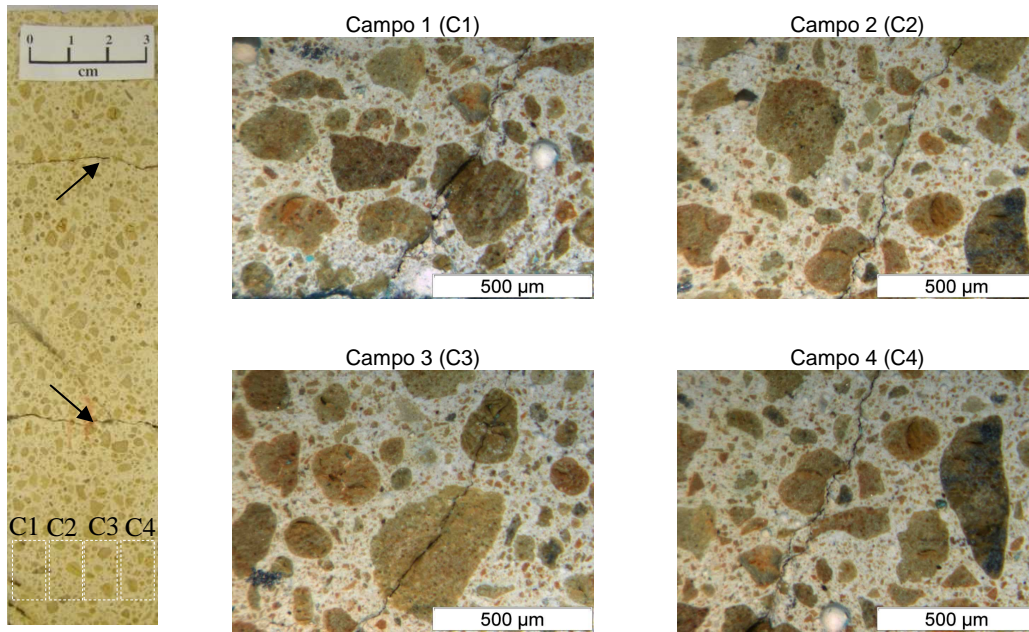
As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os aspectos finais dos corpos-de-prova após o teste de resistência ao choque térmico. As fotomicrografias C1, C2, C3 e C4 evidenciam as microestruturas dos materiais com intuito de identificar eventual



propagação de trincas decorrente da ciclagem térmica imposta aos concretos durante o ensaio.



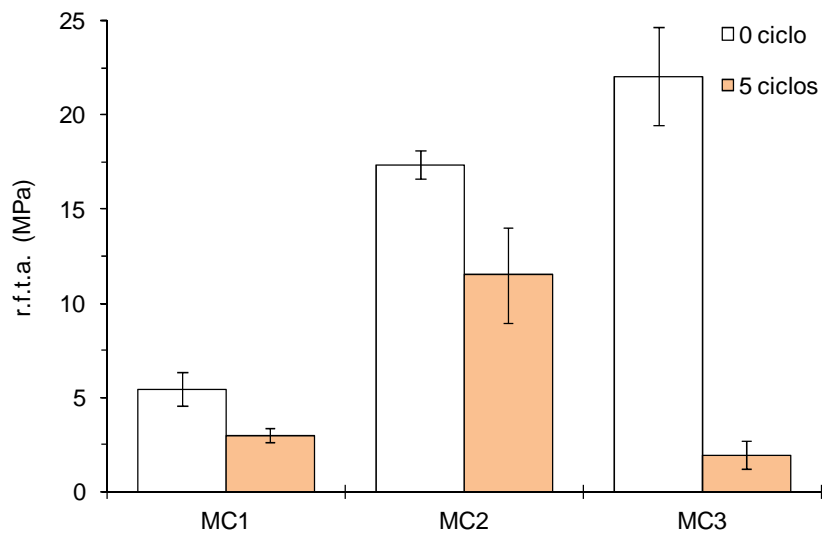




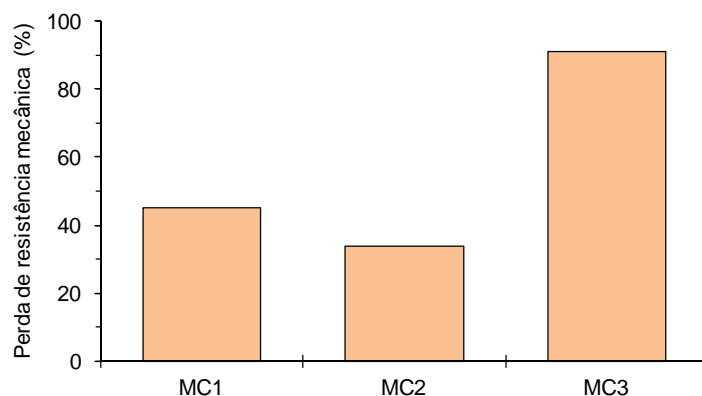
\*As setas estão indicando as trincas propagadas durante o ensaio de resistência à flexão a temperatura ambiente.

**Figura 11.** Aspecto final do concreto MC3 após teste de choque térmico.

A resistência ao dano por choque térmico foi determinada por meio da resistência mecânica residual, ou seja, resistência à flexão a temperatura ambiente após cinco ciclos térmicos (Figuras 12 e 13).



**Figura 12.** Resistência à flexão a temperatura ambiente (r.f.t.a.) de corpos-de-prova queimados a 1200°C durante 5 horas e de corpos-de-prova após ensaio de choque térmico ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

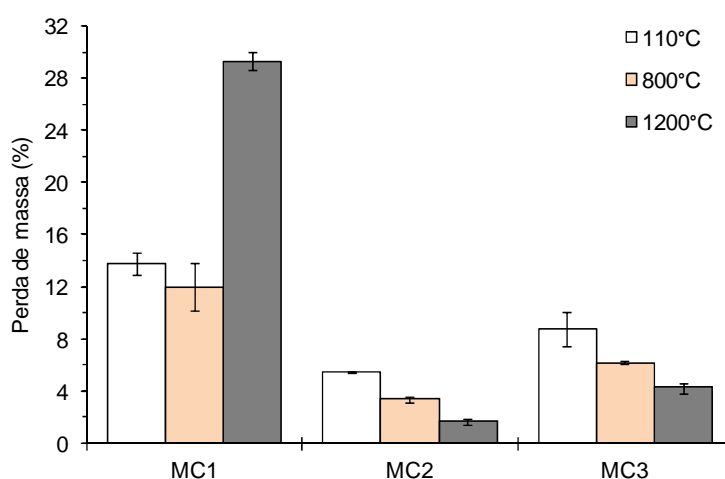


**Figura 13.** Índice médio de redução da resistência mecânica dos concretos após cinco ciclos térmicos.

Considerando-se a resistência ao choque térmico, o concreto MC2 foi o que apresentou maior valor de resistência residual após cinco ciclos térmicos (1.000°C durante 30 minutos  $\Leftrightarrow$  fluxo ar durante 30 minutos). Por outro lado, os concretos MC3 e MC1 apresentaram, nessa ordem, maior perda de resistência mecânica após ciclagem térmica. Os resultados do teste de choque térmico fornecem indicativos de que a resistência mecânica a quente exerça influência sobre o dano por choque térmico. Considerando os valores de resistência mecânica dos três concretos, verificou-se que o valor elevado de resistência mecânica a 1.200°C do concreto MC3 afetou negativamente a resistência ao dano por choque térmico desse material.

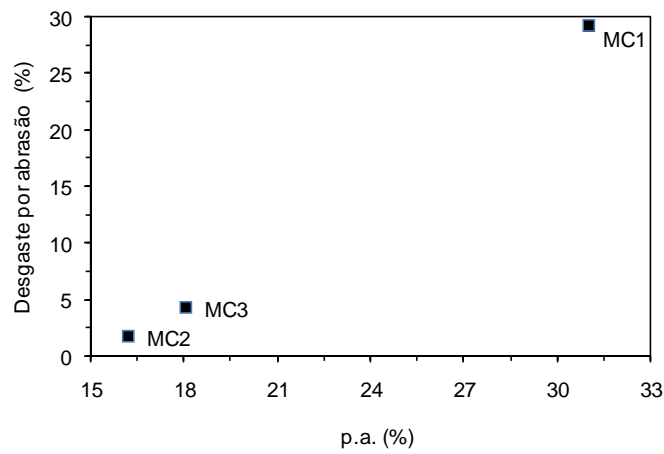
### 3.6 Resistência à Abrasão

Com relação ao ensaio para avaliar a resistência à abrasão (principal solicitação mecânica imposta ao revestimento de algaraviz) de corpos-de-prova secos a 110°C e queimados a 800°C e 1.200°C, os resultados indicaram que os concretos MC2 e MC3 exibiram melhor desempenho (Figura 14).

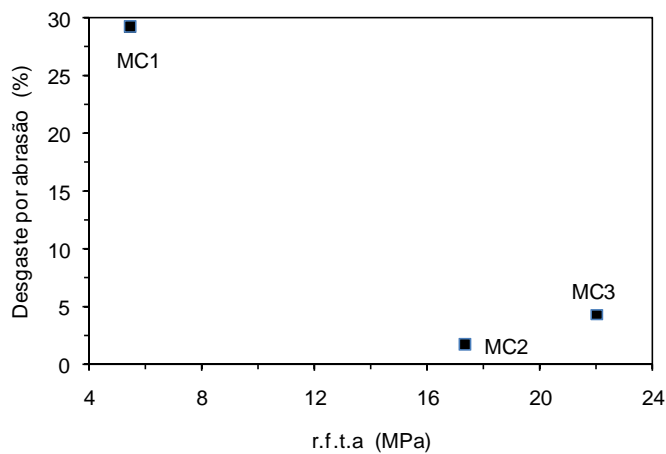


**Figura 14.** Índice de perda de massa dos corpos-de-prova após experimento para avaliar a resistência à abrasão. Os corpos-de-prova foram secos a 110°C durante 24 horas e queimados a 800°C e 1.200°C durante 5 horas ( $\bar{x} \pm \sigma_{n-1}$ ).

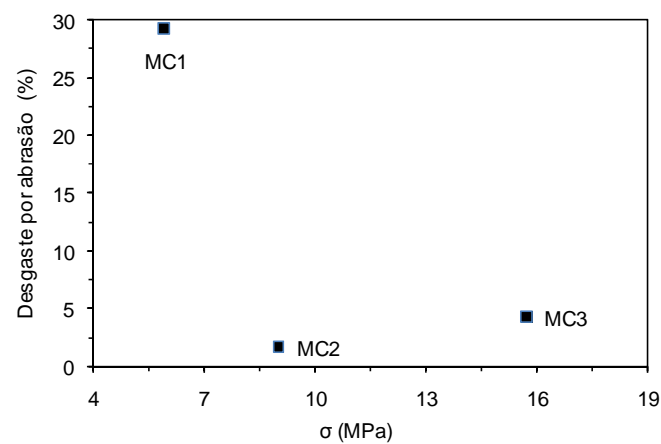
As Figuras 15, 16 e 17 mostram o comportamento do desgaste por abrasão em função da porosidade aparente, resistência à flexão a temperatura ambiente e resistência à flexão a quente, respectivamente.



**Figura 15.** Desgaste por abrasão após queima a 1200°C em função da porosidade aparente após queima a 1.200°C.



**Figura 16.** Desgaste por abrasão após queima a 1200°C em função da resistência à flexão a temperatura ambiente (r.f.t.a.) após queima a 1.200°C.



**Figura 17.** Desgaste por abrasão após queima a 1200°C em função da resistência à flexão a 1.200°C.

Com base nos gráficos apresentados (Figuras 15, 16 e 17) é possível estabelecer uma relação entre as propriedades físicas (porosidade aparente, resistência à flexão a temperatura ambiente e resistência à flexão a quente) e a taxa de desgaste por abrasão. A análise conjunta dos resultados permite inferir que o incremento na quantidade de poros (defeitos) tende a diminuir a resistência mecânica do material. Em consequência disso, ocorre um aumento na taxa de desgaste por abrasão. Essa análise explica a maior taxa de desgaste por abrasão apresentada pelo concreto MC1. Já os concretos MC2 e MC3 exibiram menor índice de desgaste por abrasão. Comparando as características do concreto MC1 com os concretos MC2 e MC3, nota-se que estes possuem menor porosidade aparente e superior resistência mecânica. Essas características concorrem para minimizar a taxa de desgaste por abrasão. Tal observação ganha mais importância, sobretudo, quando se considera as principais solicitações que o revestimento de algaraviz está sujeito, o eventual atrito das partículas suspensas no ar aquecido soprado através dos regeneradores exige que o material empregado apresente alta resistência ao desgaste por abrasão.

#### 4 CONCLUSÕES

A combinação dos resultados laboratoriais permitiu definir novos critérios para seleção de concretos refratários para emprego no revestimento de algaraviz de alto-forno. De uma forma geral, mantido um compromisso entre as propriedades físicas (porosidade aparente, resistência mecânica, resistência à abrasão e resistência ao choque térmico), verificou-se fortes indícios de que a resistência à tensões de natureza térmica e mecânica seja uma das características mais importantes para o desempenho industrial do revestimento de algaraviz. Por esta razão, o concreto MC2 contendo baixo teor de cimento (1,4% de CaO) apresentou melhor desempenho, ou seja, maior potencial para emprego industrial. Além disso, tal metodologia empregada neste estudo foi eficiente para diferenciar concretos refratários para algaraviz, podendo contribuir não só para a seleção como, também, para o desenvolvimento de novos produtos.

#### REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, S. N.; MARTINS, D. I.; FURTADO, H. S.; SAMPAIO, A. P.; ANDRADE, R. M.; CUNHA, F. M.; Projeto de revestimento de baixa condutividade térmica para algaravizes de alto forno. Trabalho apresentado no XXIX Seminário Sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, São Paulo, SP, Maio de 1998.
- 2 ARAÚJO L.A.; Manual de Siderurgia. 2ª Edição. Produção Vol.01. Arte & Ciência Editora.
- 3 ABNT. Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção de densidade aparente da parte sólida; NBR6220. Rio de Janeiro: 1997. 2 p.
- 4 ABNT. Determinação da variação linear dimensional; NBR 6225. Rio de Janeiro: 1993. 2 p.
- 5 ABNT. Determinação da resistência à flexão a temperatura ambiente, NBR 6113. Rio de Janeiro: 1997. 2 p.
- 6 ABNT. Determinação da resistência à flexão a quente; NBR 9642. Rio de Janeiro: 1999. 2 p.
- 7 BANERJEE, S. Monolithic refractories, 1<sup>ed</sup>, Westerville, USA, **The American Ceramic Society**, 1998, 311 p.