

# Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono

## *(Evaluation of the thermal shock resistance of carbon-containing refractories)*

M. A. Quintela<sup>1</sup>, T. M. F. de Melo<sup>1</sup>, I. J. Lage<sup>1</sup>,  
V. C. Pandolfelli<sup>2</sup>, J. A. Rodrigues<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Usiminas, Ipatinga-MG.

<sup>2</sup>GEMM, Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar  
Rod. Washington Luiz, km 235, S. Carlos, SP, 13565-905.

vicpando@power.ufscar.br, josear@power.ufscar.br

### Resumo

Face à complexidade, ao custo e à duração dos testes cíclicos para avaliação da resistência ao choque térmico, os refratários contendo carbono têm sido tipicamente selecionados com base na sua superior condutividade térmica. Por essa razão, é importante uma avaliação das principais propriedades dos refratários, visando não apenas estabelecer critérios de seleção, mas, também, permitir à engenharia de projetos efetuar modificações na sua microestrutura, possibilitando assim superior desempenho do revestimento. Este trabalho apresenta os principais aspectos teóricos e a técnica adotada na Usiminas para avaliação da resistência ao choque térmico de materiais contendo carbono. A metodologia contempla a medida da energia de fratura utilizando a técnica de CMOD (*crack mouth opening displacement*) e a determinação dos parâmetros de resistência ao dano por choque térmico,  $R'''$  e  $R_{st}$ .

Palavras-chave: refratários, choque térmico, mecânica de fratura.

### Abstract

*Due to complexity, cost and time involved in evaluating the thermal shock resistance, carbon-containing refractories are usually selected based only on the thermal conductivity. It is therefore necessary to evaluate the physical properties that affect the thermal shock behavior of refractories and to generate suitable criteria for selection and development of microstructure aiming to increase the lining life. The present paper presents the methodology used at Usiminas for the determination of the thermal shock damage resistance of carbon-containing refractories for casting ladles. The test method adopted involves measurements of the fracture energy using CMOD (*crack mouth opening displacement*) and the determination of the thermal shock parameters ( $R'''$  e  $R_{st}$ ).*

*Keywords: refractories, thermal shock, fracture mechanics.*

## INTRODUÇÃO

O consumo específico de refratários na indústria siderúrgica tem sido gradualmente reduzido ao longo de décadas, face à evolução das técnicas de fabricação do aço e ao avanço no desenvolvimento de novos materiais refratários. Tais melhorias são frutos de um melhor entendimento do dano provocado por choque térmico e sua relação com outros modos de degradação destes materiais, incluindo erosão e ataque por escória [1].

As práticas metalúrgicas em painéis conduzem a gradientes e variações cíclicas de temperatura dos seus revestimentos, causando geração de tensões térmicas, que podem provocar o crescimento de trincas no refratário e afetar seu desempenho. Essa condição é conhecida como dano por choque térmico.

O uso de refratários contendo carbono no revestimento de painéis de aço, quer seja na região de escória, banho ou sola, trouxe efetivos ganhos em termos de resistência ao dano por choque térmico.

Este trabalho descreve a metodologia adotada na Usiminas para avaliação da resistência ao choque térmico de materiais refratários, a qual pode também ser de grande utilidade ao produtor destes materiais. A energia de fratura foi medida a partir da técnica da abertura da boca da trinca (CMOD - *crack mouth opening displacement*). Foram também determinados dois parâmetros de resistência ao dano por choque térmico,  $R'''$  e  $R_{st}$ .

## ASPECTOS TEÓRICOS

### *Choque Térmico*

Em termos de resistência ao dano por choque térmico, os refratários contendo carbono têm sido tipicamente selecionados com base na sua superior condutividade térmica. A condutividade térmica afeta o nível de desenvolvimento de tensão transiente. Quanto maior a condutividade, mais homogênea a distribuição de

tensões e menor a tensão máxima desenvolvida no sistema.

Tradicionalmente, os testes de choque térmico têm sido realizados com intuito de avaliar comparativamente os efeitos da variação cíclica de temperatura via indicadores de dano, tais como número de ciclos térmicos para causar trincas, perda de peso, redução da resistência mecânica e redução do módulo de elasticidade. Isoladamente, os testes usualmente utilizados para avaliar a resistência à variação cíclica de temperatura são bastante limitados, pois não permitem monitorar o comportamento da fratura. Além disso, a susceptibilidade à oxidação do carbono e a boa resistência ao dano por variação cíclica de temperatura são os maiores desafios na execução e na interpretação dos testes para avaliação da resistência ao dano por choque térmico dos refratários contendo carbono. A oxidação do carbono modifica as propriedades iniciais, concorrendo diretamente para comprometer a interpretação dos resultados. A elevada resistência ao dano por choque térmico implica na execução de ciclos térmicos múltiplos e de longa duração, inviabilizando os testes do ponto de vista econômico.

#### Energia total de Fratura ( $\gamma_{wof}$ )

A medida do trabalho de fratura foi inicialmente efetuada, independentemente, por Nakayama e por Tattersall e Tappin [2]. Nakayama definiu a configuração de uma amostra com entalhe especial e utilizou uma máquina de teste rígida o suficiente para permitir o acompanhamento da propagação da trinca na amostra. O método consiste, basicamente, em monitorar a propagação estável de trinca na amostra entalhada, através do registro da curva carga-deslocamento, no ensaio de flexão a três pontos. A área sob a curva carga-deslocamento fornece a energia consumida no processo com-

pleto de fratura. A energia de fratura dividida pela projeção planar da área das duas superfícies de fratura gera o termo energia total de fratura ( $\gamma_{wof}$ ), geralmente expresso em J/m<sup>2</sup>, conforme a equação-A.

$$\gamma_{wof} = \frac{\int Pdu}{2A}, \quad (A)$$

onde  $\int Pdu$  é a área sob a curva carga-deslocamento e A é a área projetada da superfície de fratura resultante.

O uso de amostra entalhada com seção triangular (entalhe em “V” ou *chevron*) permite gerar uma concentração de tensão no vértice da seção, favorecendo a propagação estável da trinca [2].

#### Parâmetros $R'''$ e $R_{st}$

A propagação de trinca pode ocorrer de modo quase-estático ou cinético, dependendo do tamanho das trincas antes do choque térmico. As expressões analíticas para o critério de propagação de trinca são baseadas em parâmetros de resistências ao choque térmico propostos por Hasselman. A validade da correlação desses parâmetros com a resistência ao choque térmico tem sido amplamente verificada na prática [1-4].

Hasselman propôs um parâmetro de resistência ao dano por choque térmico, denominado  $R'''$ , especificamente derivado para materiais com elevada resistência mecânica ou com trincas inicialmente curtas, conforme a equação-B.

$$R''' = \frac{E\gamma_{wof}}{\sigma_f^2 (1 - \mu)}, \quad (B)$$

Tabela I – Características gerais dos tijolos para painéis de aço.  
[Table I – General characteristics of the ladle bricks.]

Tijolo	MC1					MC2					AC					A	AMC				
Categoria	MgO-C										Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -C					Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO-C				
T (x10 <sup>2</sup> °C)	8	10	12	14	15	8	10	12	14	15	8	10	12	14	15	-	8	10	12	14	15
MgO	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							t	x	x	t	t
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> α											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
C	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
Si	t	t									x	x	t				t	t			x
Al	t					x					t						t				
MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		t	t	x	x		x	x	x	x											x
3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>						t	t	t													
SiC													t	t							
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>			t	x						x											
Obs.: T = Temperatura de coqueificação, x = Fase presente, t = Traços da fase.																					
C (%)	10,8 <sup>(i)</sup>					9,6 <sup>(i)</sup>					8,1 <sup>(i)</sup> 0						6,9 <sup>(i)</sup>				
d.m.a. (g/cm <sup>3</sup> )	2,95 <sup>(i)</sup>					3,00 <sup>(i)</sup>					3,23 <sup>(i)</sup>					2,95	2,95 <sup>(i)</sup>				
p.a. (%)	9,2 <sup>(i)</sup>					8,6 <sup>(i)</sup>					9,0 <sup>(i)</sup>					9,2	14,2 <sup>(i)</sup>				

(i) Amostras previamente coqueificadas a 1400 °C durante 5 horas.

onde  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\sigma_f$  é a tensão de ruptura e  $\mu$  é a razão de Poisson.

Subseqüentemente, Hasselman desenvolveu a teoria unificada de choque térmico para um sólido uniformemente resfriado, definindo um parâmetro de estabilidade de trincas,  $R_{st}$ , para refratários de menor resistência, contendo trincas inicialmente longas, e, dessa forma, sujeitos ao crescimento quase-estático de trincas. Tal comportamento pode ser expresso pela equação-C [1-5].

$$R_{st} = \left( \frac{\gamma_{wof}}{\alpha^2 E} \right)^{1/2}, \quad (C)$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica linear.

A microestrutura tem efeito considerável nas propriedades mecânicas de materiais refratários. O entendimento disso pode conduzir ao projeto de materiais, privilegiando as propriedades que levam à maximização de  $R_{st}$  e  $R_{st}$ . A influência aparentemente antagônica de  $E$  nas equações-B e -C é um resultado das diferentes formas de expressar a energia de deformação. O procedimento mais comum para maximizar  $R_{st}$  e  $R_{st}$  no projeto de materiais envolve o aumento de  $\gamma_{wof}$  e a redução de  $\sigma_f$  a níveis que possam ainda assegurar uma integridade mecânica suficiente para a operação. Uma das técnicas utilizadas para obter tais resultados é projetar refratários com estrutura de grãos grosseiros, contendo grande quantidade de microtrincas e poros pequenos [1, 4].

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Características dos Refratários

Os testes realizados neste trabalho foram conduzidos em amostras de tijolos comerciais dos sistemas MgO-C (MC1 e MC2),  $Al_2O_3$ -C (AC),  $Al_2O_3$  (A) e  $Al_2O_3$ -MgO-C (AMC) destinados ao revestimento de painéis de aço. As principais características desses refratários são apresentadas na Tabela I. As fases presentes foram determinadas por difração de raios X em amostras previamente coqueificadas nas temperaturas de 800 °C, 1000 °C, 1200 °C, 1400 °C e 1500 °C. A densidade de massa aparente (d.m.a.) e a porosidade aparente (p.a.) foram determinadas de acordo com a norma ABNT-NBR 6220 [6], utilizando-se querosene como líquido de saturação dos corpos-de-prova.

### Teste de Choque Térmico em Forno Duplo

O novo método de teste para avaliar a resistência ao dano por choque térmico, desenvolvido na Usiminas, visa simular as condições operacionais nas painéis, cujas taxas de resfriamento e aquecimento são relativamente moderadas.

O equipamento consiste de um forno tubular com câmaras de elevada e baixa temperaturas, ambas com atmosfera controlada. Os corpos-de-prova, nas dimensões de 30 mm x 30 mm x 150 mm, são transportados automaticamente da câmara de elevada temperatura para a de baixa temperatura. O resfriamento dos corpos-de-prova é promovido por um jato de nitrogênio na câmara de menor temperatura.

Os testes foram realizados entre as temperaturas de 400 °C e 1100 °C ( $\Delta T = 700$  °C), através de ciclos múltiplos de aquecimento e resfriamento (1, 3 e 6 ciclos), em corpos-de-prova previamente coqueificados a 1450 °C durante 3 horas.

### Medida da Energia Total de Fratura

Os corpos-de-prova para determinação da energia total de fratura, medindo 30 mm x 30 mm x 150 mm, foram retirados dos tijolos através de serra refrigerada com água e retificados, para eliminar irregularidades e conferir superfícies paralelas. Posteriormente, os corpos-de-prova foram secos em estufa a 110 °C durante 24 horas. Nos refratários contendo carbono, os testes foram conduzidos em amostras previamente coqueificadas a 1400 °C durante 5 horas, visando à carbonização da resina fenólica e ao desenvolvimento de estruturas de elevada resistência mecânica, através da formação de novas fases *in situ*.

A energia total de fratura foi determinada a partir de testes de flexão a três pontos, a temperatura ambiente, realizados em máquina servo-hidráulica *Instron* do tipo *closed-loop*. Os testes foram inteiramente controlados pela técnica de velocidade constante da abertura da boca da trinca (CMOD), através de extensômetro instalado em garras metálicas devidamente fixadas no corpo-de-prova, concordando com os experimentos efetuados por Leverköhne (Fig. 1) [7].

Embora essa não seja a geometria mais favorável ao crescimento estável de trinca, foi adotado um entalhe plano em substituição ao entalhe em "V" (*chevron*), face à simplicidade na sua confecção e à excelente estabilidade na propagação da trinca, proporcionada pelo controle da velocidade do CMOD, observada em testes preliminares. Os testes foram conduzidos em corpos-de-prova com profundidade de entalhe equivalente a 40% ( $a_0 = 12$  mm) da sua altura e espessura do entalhe de 0,35 mm. A distância entre apoios foi mantida em 120 mm (Fig. 1).

Na execução do teste, foi imposta ao corpo-de-prova uma pré-carga de 40 N, seguida de acomodação manual do mesmo sobre os apoios. Este procedimento teve a finalidade de eliminar eventuais desalinhamentos da montagem de flexão, que influenciam o aspecto inicial da curva carga-deslocamento, interferindo na medida do trabalho de fratura.

Os testes foram efetuados sob velocidade constante do CMOD de 8  $\mu$ m/min. Essa velocidade foi definida com base na estabilidade da curva carga-deslocamento e no tempo de teste relativamente pequeno (cerca de 45 minutos). Os testes foram interrompidos quando a carga caiu para cerca de 10% do valor máximo alcançado no ensaio.

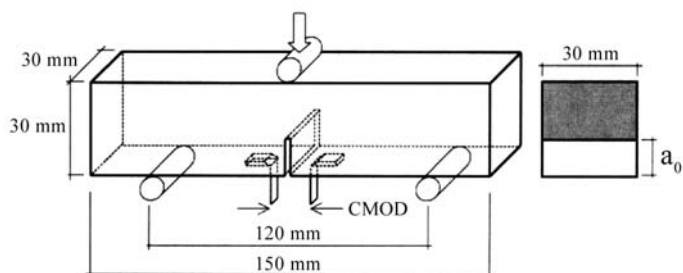


Figura 1: Configuração do corpo-de-prova para medida da energia total de fratura [7].

[Figure 1: Sample arrangement for work of fracture measurement [7].]

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise do Método de Choque Térmico em Forno Duplo

O dano provocado por choque térmico em forno duplo foi avaliado através da medida da resistência à flexão a temperatura ambiente retida após 1, 3 e 6 ciclos térmicos (Fig. 2).

Os resultados indicaram que os refratários contendo carbono não apresentaram degradação da resistência mecânica, mesmo após 6 ciclos térmicos. Por outro lado, o refratário sem carbono (A) exibiu pronunciada queda da resistência mecânica no 3º ciclo e sucessiva tendência de estabilização do dano até o 6º ciclo. Portanto, o teste não permitiu caracterizar a resistência ao dano por variação cíclica de temperatura, até 6 ciclos, dos refratários contendo carbono, embora tenham indicado a degradação da resistência mecânica do refratário sem carbono (A).

### Análise da Técnica do CMOD

O principal propósito da medida da energia total de fratura e da determinação dos parâmetros de resistência ao dano por choque

térmico,  $R''''$  e  $R_{st}$  e da razão  $\gamma_{wof}/(p.a.)$  é estabelecer indicadores da qualidade do material e prever o impacto de eventuais modificações no projeto do refratário, tais como: mudanças no teor e tipo de carbono e anti-oxidantes, na granulometria, etc. As análises dessas propriedades devem ser conduzidas em grupos de refratários de categorias semelhantes e não de modo generalizado. Por essa razão, foram avaliados isoladamente os tijolos MC1 e MC2 (MgO-C), os AC e A ( $Al_2O_3$ -C e  $Al_2O_3$ , respectivamente) e o AMC ( $Al_2O_3$ -MgO-C).

Com a técnica do CMOD utilizada neste trabalho, a velocidade de abertura da trinca interage com a velocidade de deslocamento do pistão, propiciando total controle da propagação da trinca. A Fig. 3 ilustra a propagação estável de trinca (Fig. 3a) e o controle do deslocamento do pistão proporcionado pelo CMOD (Fig. 3b).

Durante o teste, a velocidade de deslocamento da abertura da boca da trinca (CMOD) é mantida constante. Enquanto isso, a velocidade de deslocamento do pistão atinge valores mais elevados no início do teste para promover a iniciação da trinca e, subsequentemente, reduz para proporcionar um crescimento estável da trinca. A velocidade constante do deslocamento da abertura da boca da trinca (CMOD) implica em velocidade constante de crescimento da trinca.

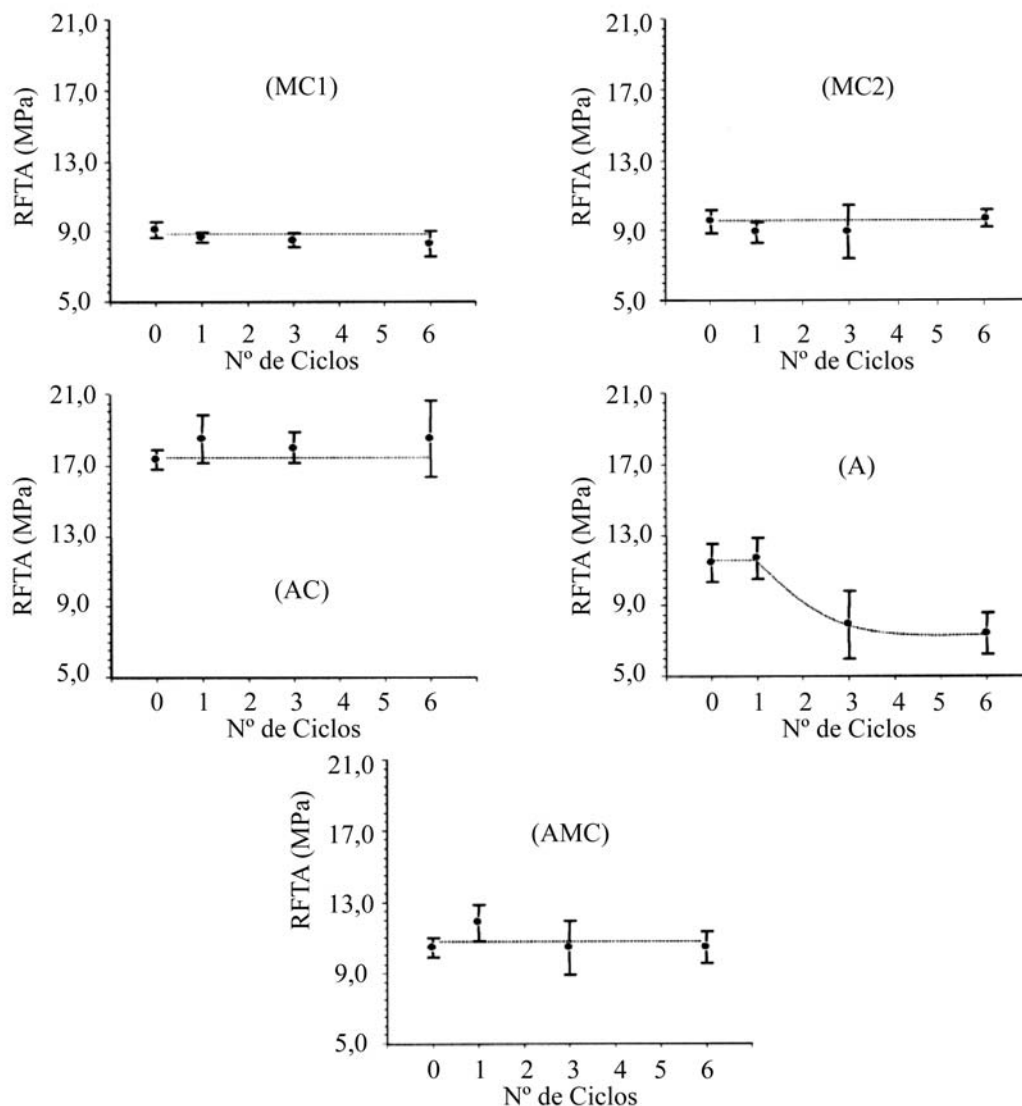


Figura 2: Efeito do número de ciclos térmicos ( $\Delta T = 700\text{ }^\circ\text{C}$ ) na resistência à flexão dos tijolos para painéis. [Figure 2: Effect of the thermal cycling ( $\Delta T = 700\text{ }^\circ\text{C}$ ) on the bending strength of ladle bricks.]

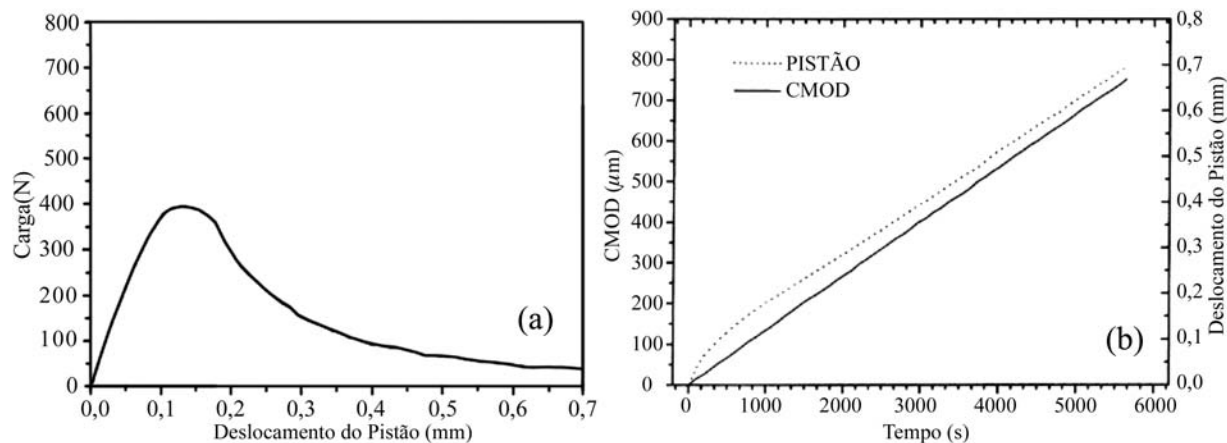


Figura 3: (a) Curva típica de carga-deslocamento do pistão e (b) curvas de abertura do extensômetro (CMOD) e de deslocamento do pistão versus tempo de ensaio. [Figure 3: (a) Typical example of a load-actuator displacement curve and (b) the related CMOD and actuator displacement versus time profiles.]

Tabela II - Propriedades gerais dos refratários para panelas. [Table II - General properties for the ladle refractory bricks.]

Tijolo	MC1	MC2	AC	A	AMC
Categoria	MgO-C		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -MgO-C
$\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	15,0 x 10 <sup>-6</sup>	17,6 x 10 <sup>-6</sup>	9,02 x 10 <sup>-6</sup>	7,70 x 10 <sup>-6</sup>	9,66 x 10 <sup>-6</sup>
E (GPa) <sup>(ii)</sup>	23,5	28,2	25,9	31,3	27,0
$\sigma_f$ (MPa) <sup>(ii)</sup>	8,4	12,3	14,8	15,3	10,3
$\gamma_{wof}$ (J/m <sup>2</sup> ) <sup>(ii)</sup>	95,2	84,1	100,0	64,2	40,5
$\gamma_{wof}/(p.a.)$	10,3	9,8	11,1	7,0	2,9
R <sup>***</sup> (x 10 <sup>-2</sup> m)	3,9	2,0	1,5	1,1	1,3
R <sub>st</sub> (m <sup>1/2</sup> °C)	4,3	3,1	6,9	5,9	4,0

(ii) média de 4 corpos-de-prova.

A Tabela II apresenta os resultados da energia total de fratura e dos parâmetros de resistência ao dano por choque térmico, R<sup>\*\*\*</sup> e R<sub>st</sub>, dos refratários para panelas, calculados através das equações B e C. A Tabela II também mostra os valores de outras propriedades, incluindo a razão  $\gamma_{wof}/(p.a.)$ .

A Fig. 4 mostra as curvas carga-deslocamento do pistão, a morfologia dos grãos e o aspecto das trincas dos refratários MC1 (Fig. 4a) e AC (Fig. 4b). Nos tijolos MC1, MC2, AMC e A, o início da propagação da trinca ocorreu sob carga relativamente inferior à do refratário AC, sobretudo no tijolo AMC. Nos refratários do sistema MgO-C (MC1 e MC2), essas curvas foram mais alongadas e descreveram um processo de propagação de trinca mais extenso em termos do deslocamento do pistão, implicando em maior deslocamento da abertura da boca da trinca.

Análises da microestrutura dos refratários indicaram que os tijolos MC1 e MC2 são compostos, primordialmente, por grãos de morfologia acicular e lamelas longas de grafita. O aspecto da superfície da fratura desses tijolos indicou uma propagação de trinca predominantemente intergranular, na forma zigue-zague (Fig. 4a). O refratário MC1 com superior teor de carbono apresentou superfície de fratura mais rugosa (MC1) e maior energia total de fratura, uma vez que exibiu trincas cujas trajetórias são mais longas.

Considerando-se os sistemas Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, embora o refratário AC tenha apresentado elevado valor de energia total de fratura, a propagação de trinca ocorreu de modo intragranular e a superfície de fratura apresentou aspecto relativamente plano (Fig. 4b). Presume-se que a maior energia total de fratura do refratário AC esteja relacionada principalmente à boa qualidade de sua matriz e à grande quantidade de grãos eletrofundidos, cuja morfologia é primordialmente poligonal, uma vez que a iniciação da trinca ocorreu sob carga elevada. A menor energia de fratura do tijolo A deve ser decorrente da forma arredondada das partículas de agregado e, também, da ausência de carbono na matriz.

A razão  $\gamma_{wof}/(p.a.)$ , na Tabela II permite inferir simultaneamente sobre o comportamento da resistência ao dano por choque térmico e à corrosão, independentemente das demais propriedades do refratário. A princípio, a maximização desta relação deve conduzir ao melhor desempenho do refratário em termo de resistência ao dano por choque térmico e à corrosão. Considerando-se os respectivos sistemas, os tijolos MC1 e AC exibiram superior razão  $\gamma_{wof}/(p.a.)$ . O baixo valor dessa razão para o tijolo AMC resultou da combinação de baixa energia total de fratura e de elevada porosidade aparente.

No sistema MgO-C, o tijolo MC1 apresentou maiores valores

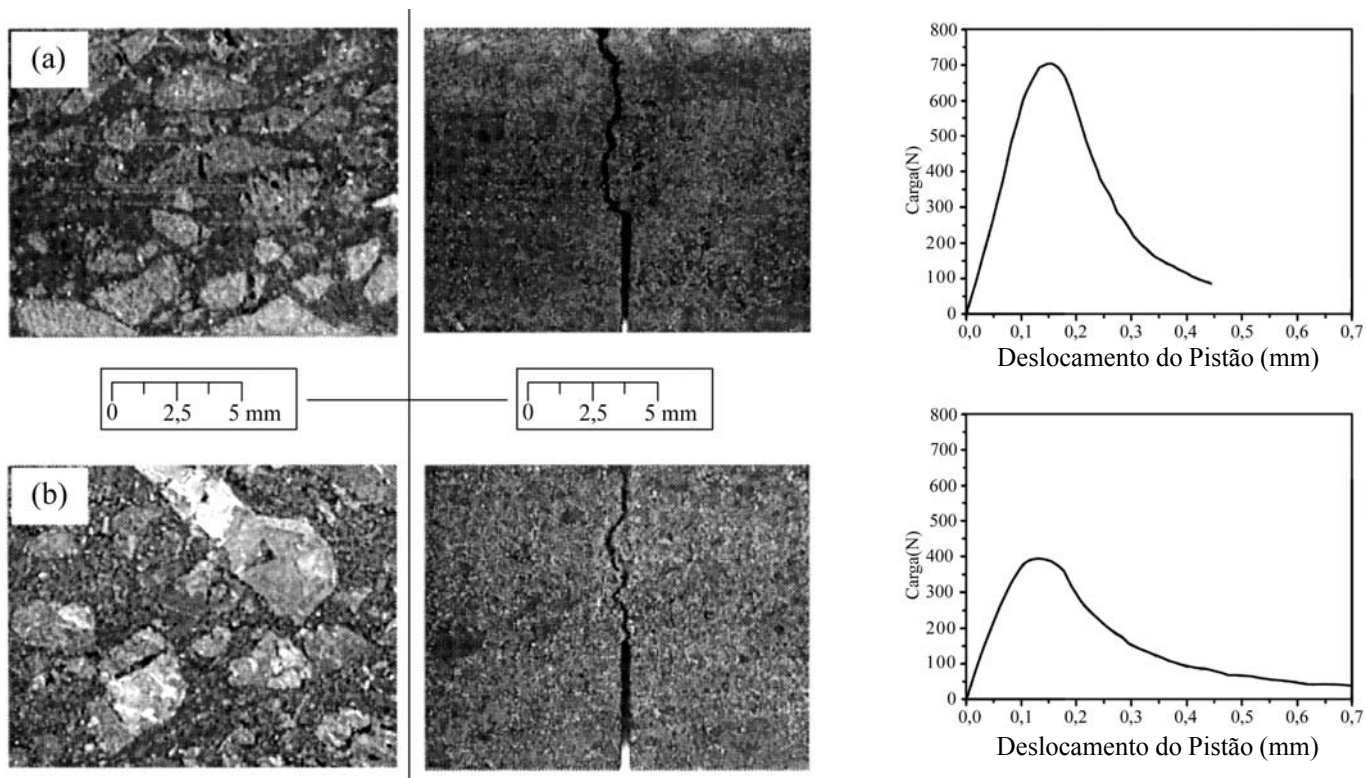


Figura 4: Morfologia dos grãos, aspecto das trincas e curvas típicas de carga-deslocamento dos tijolos MC1 (a) e AC (b).  
 [Figure 4: Grain morphology, crack path, and load-displacement curves for (a) MC1 and for (b) AC bricks.]

de  $R'''$  e  $R_{st}$ , indicando superior resistência ao dano por choque térmico. Já nos sistemas  $Al_2O_3-C$  e  $Al_2O_3$ , o refratário AC exibiu maiores valores de  $R'''$  e  $R_{st}$ . Os superiores valores de energia total de fratura,  $R'''$  e  $R_{st}$  concordaram com a maior quantidade de carbono no refratário MC1 e com a presença de carbono no tijolo AC. Os menores valores de energia total de fratura,  $R'''$  e  $R_{st}$  do tijolo A concordaram com os resultados de choque térmico em forno duplo, que indicaram queda da resistência mecânica após o 3º ciclo térmico.

## CONCLUSÕES

Os testes de choque térmico em forno duplo, após 6 ciclos térmicos, não conduziram a dano por variação cíclica de temperatura nos refratários contendo carbono.

A metodologia adotada na Usiminas para medida da energia total de fratura pela técnica de controle do CMOD apresenta-se como uma alternativa muito importante em termos de tempo de execução dos testes e rigorosa manutenção da propagação estável de trinca.

A energia total de fratura, os parâmetros  $R'''$  e  $R_{st}$  e da razão  $\gamma_{vor}/(p.a.)$ , para refratários de uma mesma família, representam indicadores da qualidade do material e podem conduzir ao projeto otimizado de novos refratários em termos de choque térmico.

No sistema MgO-C, o refratário que apresentou superfície de fratura mais rugosa (MC1) forneceu maior energia total de fratura. Já nos sistemas  $Al_2O_3-C$  e  $Al_2O_3$ , o tijolo AC apresentou superior energia de fratura. Para materiais do mesmo tipo, tais como MC1 e

MC2 ou A e AC, o aumento do teor de carbono causou o aumento na energia total de fratura e nos parâmetros  $R'''$  e  $R_{st}$ .

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e ao CNPq pelo auxílio e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Homeny, R. C. Bradt, "Thermal shock of refractories", Plenum Publishing Company, New York, Edited by D. P. H. Hasselman and R. A. Heller (1980) 1-21.
- [2] R. C. Bradt, Am. Ceram. Soc. Bull. **67**, 7 (1988) 1176-1178.
- [3] D. P. H. Hasselman, J. Am. Ceram. Soc. **52**, 11 (1969) 600-604.
- [4] V. C. Pandolfelli, "Choque térmico em cerâmicas técnicas e refratários", UFSCar, S. Carlos, SP (1994) 45.
- [5] A. C. D. Charklader, F. Bradley, Anais do UNITECR'89 (1989) 1225-1233.
- [6] NBR-6220, ABNT, "Materiais refratários densos - Determinação da densidade de massa aparente, porosidade aparente, absorção e densidade aparente da parte sólida - Método de ensaio", Rio de Janeiro (1997) 2.
- [7] M. Leverköhne, "Investigation of R-curve measurement techniques applied to MgO-C refractory", 2nd Educational Project. Universidade Federal de S. Carlos e Technische Universität Hamburg-Harburg (1996) 49. (Rec. 16/06/01, Ac. 12/10/01)