

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CHOQUE
TÉRMICO DE MATERIAIS REFRAATÓRIOS (1)

Julio César Vasconcellos Castro (2)

Gerson Corrêa Filho (3)

Marcelo Aguiar Godinho (4)

R E S U M O

Faz-se um resumo da literatura existente sobre métodos de teste de choque térmico padronizados e outros métodos propostos em evidência. Apresenta-se o método de teste desenvolvido, que caracteriza-se pela existência de um gradiente de temperatura ao longo do comprimento dos corpos de prova, durante seu aquecimento, simulando mais as condições observadas na prática. A resistência ao choque térmico dos refratários, baseia-se na avaliação de seu desgaste decorrente de lascamentos sucessivos após vários ciclos térmicos. O uso de padrões fotográficos de interpretação simples permite a fácil documentação dos resultados.

-
- (1) - Contribuição técnica ao Simpósio da COREF; Vitória, ES; Outubro, 1982.
- (2) - Membro da ABM e ABC. Engenheiro Metalurgista; Centro de Pesquisas da USIMINAS; Ipatinga - MG.
- (3) - Membro da ABM e ABC. Engenheiro Químico; Centro de Pesquisas da USIMINAS; Ipatinga - MG.
- (4) - Membro da ABM, Assistente Técnico; Centro de Pesquisas da USIMINAS; Ipatinga - MG.

1. INTRODUÇÃO

Os refratários usados nos processos de fabricação do aço frequentemente sofrem "spalling" já que são submetidos a severas alterações cíclicas de temperatura. O termo "spalling" significa ocorrência de trinca que conduz ao lascamento dos refratários. É portanto um exemplo notável do desgaste por choque térmico. Considerando que o "spalling térmico" leva ao lascamento dos tijolos, em fragmentos de mais de 10mm de comprimento de cada vez, o efeito negativo sobre o consumo de refratários e na disponibilidade do equipamento é bem maior quando comparado com sua erosão ou corrosão que mostram taxas de desgaste relativamente constantes. Muitos dos testes usados por fabricantes e usuários, para se determinar a resistência ao choque térmico de materiais refratários, são padronizados por associações reconhecidas internacionalmente como o A.S.T.M., P.R.E., B.S. JIS, DIN, etc. Embora a literatura sobre o assunto seja bastante vasta, os métodos padronizados existentes muitas vezes não refletem o comportamento do refratário sob variação cíclica de temperatura. O método descrito neste trabalho visa justamente suprimir essa deficiência dos outros, sendo a resistência ao choque térmico avaliada com base no desgaste dos refratários, decorrente de lascamentos sucessivos, após vários ciclos térmicos.

2. MÉTODOS DE TESTE DE CHOQUE TÉRMICO PADRONIZADOS

Analisando-se as normas mais conhecidas internacionalmente, observa-se a existência dos seguintes testes de choque térmico padronizados:

2.1 - Teste de Painel - A.S.T.M. C38

Esse teste destina-se à determinação da resistência dos tijolos refratários aos efeitos individual e combinado do "spalling" térmico e estrutural. Basicamente o teste consiste de um período de pré-aquecimento de 24h após o que o painel é resfriado e observada a sua aparência. Para provocar o "spalling" os painéis são alternados entre o forno de aquecimento e o resfriamento através de um ven

tilador com um Spray de água. Isto é feito um número de ciclos desejado ao final do que os tijolos são removidos limpos e pesados. As perdas de peso, dadas como percentagem do peso original, são anotadas e juntamente com a avaliação do estado do painel, constituem o critério de comparação da resistência ao choque térmico.

2.2 - Teste do Cilindro - Resfriamento em Água - P.R.E./R5, Parte 1

O teste é realizado em corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 50mm de altura, retirados dos tijolos em estudo. Os corpos de prova são secos a 100°C e então colocados em um forno elétrico a 950°C. Após 15 min nessa temperatura, eles são imersos em água corrente com temperatura situada entre 10 - 20°C, durante 3 minutos. Após isto, são secos a 110°C em 30 minutos e retornam ao forno de teste a 950°C. Este procedimento é repetido até falha do refratário ou seja, até que se divida em dois ou mais pedaços grandes. A resistência ao choque térmico é dada pelo número de resfriamentos que o material suporta até sua falha.

2.3 - Teste do Prisma - Resfriamento com Ar - P.R.E./R5, Parte 2.

Este teste é adequado para os refratários que não podem ser testados pelo método anterior. Neste caso, os corpos de prova são prismáticos com dimensões de 114 x 64 x 64mm e a temperatura de teste é também 950°C. Uma vez atingida essa temperatura, os corpos de prova são colocados no forno durante 45 minutos, sendo a seguir removidos e resfriados com ar comprimido, sobre uma chapa de aço, durante 5 minutos. Após o resfriamento, os corpos de prova são testados quanto à resistência à flexão sob uma tensão de 3 kgf/cm². Os corpos de prova retornam ao forno e esse procedimento se repete até falha do material.

2.4 - Teste do Prisma Pequeno - B.S. 1902, Parte 1A.

Utilizam-se corpos de prova de 3" x 2" x 2" (76,2 x 50,8 x 50,8mm), que após secagem são colocados em forno frio, aquecido até a temperatura de teste. Geralmente, para tijolos de sílica recomenda-se uma temperatura de 450°C, enquanto para tijolos sílico-aluminosos, sili

cosos ou alta-alumina, 1000°C ou 1200°C. Os corpos de prova mantidos a essa temperatura durante 30 minutos, são removidos do forno e deixados resfriar sobre tijolos sílico-aluminosos livres de corrente de ar. Após resfriamento por 10 minutos dessa maneira, retornam ao forno por mais 10 minutos e o ciclo se repete. No final de cada ciclo de resfriamento os corpos de prova são examinados quanto a trincas e perdas nas quinas. Deve-se exercer sobre eles, um esforço com as mãos ou através de uma armação como mostrado na figura 1. O teste deverá ser considerado concluído quando houver separação de partes no corpo de prova. A resistência ao choque térmico é dada pelo número de ciclos que o material suporta até sua falha.

2.5 - Teste de Spalling com Gradiente de Temperatura - DIN 51068

São usados corpos de prova de 230 x 114 x 65mm, submetidos anteriormente a secagem (110°C) até peso constante. O corpo de prova é aquecido até 950°C por 50', num forno elétrico segundo esquema da figura 2. Em seguida, procede-se o resfriamento em água (5 min) como ilustrado na figura 3. Deixa-se então resfriar ao ar por mais 5 min., e aquece-se novamente durante 15 min. Repete-se o ciclo. Considera-se o ensaio terminado quando ocorre fragmentação de no mínimo 50% da extremidade resfriada.

Essa mesma norma descreve o ensaio com um corpo de prova cilíndrico de 50 x 50 Ømm, aquecido a 950°C durante 15 minutos e mergulhado em água durante 3 min. Repete-se o ciclo até rompimento da amostra em 2 ou mais pedaços.

2.6 - Teste de Refratários Monolíticos - B.S. 1902, Parte 1C.

Os corpos de prova são preparados nas dimensões de 230 x 114 x 76mm por socagem ou vertimento. São pré-queimados na temperatura de utilização do material, montando-os em uma porta de um forno revestida com material isolante. Para realização do teste de choque térmico, os orifícios da porta do forno onde serão colocados os corpos de prova são vedados por peças refratárias. Uma vez atingida a temperatura de teste, estas peças são substituídas pelas amostras pré-queimadas, tal que a face exposta ao calor direto é colocada dentro do forno. A outra extremidade do corpo de prova é mantida fixa por

meio de um dispositivo metálico. Após 20 minutos, as amostras são imersas em água corrente, numa profundidade de 5cm durante 1 minuto e mantidas ao ar por 18 minutos antes do próximo aquecimento.

O teste é encerrado quando 10% do peso total do corpo de prova é perdido ou após 20 resfriamentos sucessivos.

3. MÉTODOS NÃO PADRONIZADOS

- Teste "Ribbon" - A avaliação da resistência ao choque térmico do material refratário é realizada através da variação do módulo de ruptura, após ciclos de aquecimento e resfriamento do corpo de prova. Esse método, bem como todos aqueles baseados na medida da variação de uma determinada propriedade física após choque térmico, vem despertando grande interesse.
- Teste do Tijolo Paralelo Cortado na Diagonal - Esse método considera que a forma do corpo de prova obtido seccionando-se diagonalmente um tijolo paralelo normal, apresenta-se mais desfavorável que a do prisma pequeno (B.S, 1902, Parte 1A), com relação à variação brusca de temperatura (aquecimento a 1000°C e resfriamento em água). Assim, espera-se reduzir o tempo gasto na execução do ensaio. Na descrição do método⁽⁴⁾, o autor destaca que para classificação, o melhor critério seria o de comparação com padrões fotográficos.
- Teste de Choque Térmico com Resfriamento Uni-direcional - Nesse método, os corpos de prova prismáticos, após aquecimento a 1000°C , são resfriados sobre uma placa de cobre refrigerada com água.
- Teste no Forno de Dupla-Câmara - Utiliza-se um forno de duas câmaras, tal que em uma delas a temperatura é mantida a 1250°C enquanto na outra, a temperatura é a ambiente. Os corpos de prova prismáticos, montados em uma armação de refratário socado de alta-alumina, são alternados entre uma câmara e outra, a cada 10 minutos.
- Emissão Acústica - A amostra de refratário é colocada em um painel de tal forma que uma de suas extremidades é aquecida rapidamente e em seguida resfriada. A emissão acústica causada pela formação de trinca é detectada e o número total de emissões versus temperatura da face quente durante o aquecimento serve de base pa

ra comparação da resistência dos refratários ao choque térmico.

4. MÉTODO DE TESTE COMPARATIVO DESENVOLVIDO NA USIMINAS

A experiência tem mostrado que os métodos de testes existentes tem altos custos operacionais ou são limitados com relação aos critérios de comparação de resultados. Nos testes padronizados mencionados anteriormente, adota-se basicamente, como critério de avaliação, o ponto de falha do material e não o grau de dano progressivo.

O empenho constante em buscar métodos de teste de laboratório que mais simulem os mecanismos de desgaste ou reproduzam o desgaste dos refratários usados na USIMINAS, para selecionar produtos de diferentes fabricantes ou mesmo desenvolver sua qualidade, resultou no desenvolvimento de um teste de choque térmico comparativo cuja avaliação de resultados é feita de forma quantificada. A necessidade de se desenvolver testes para produtos de aplicação específica, juntamente com as considerações anteriores, levaram a um teste comparativo simples que acredita-se reproduzir uma das formas de desgaste dos tijolos refratários dos revestimentos dos equipamentos utilizados durante a fabricação do aço. Ali, principalmente em se tratando de operação intermitente, o lascamento progressivo do refratário é uma das causas de desgaste.

4.1 - Desenvolvimento do Método

Durante a fabricação do aço, o revestimento refratário dos equipamentos usados, após pré-aquecimento, entra em contacto com o aço líquido a uma temperatura de cerca de 1600°C , durante um determinado tempo. Neste período, a face dos tijolos exposta ao banho metálico - face quente - atinge uma temperatura próxima à do banho. Na face oposta - face fria - a temperatura não se eleva tanto, existindo portanto um gradiente térmico ao longo do comprimento do tijolo.

Após vazamento e/ou tratamento do aço, ocorre o resfriamento

do revestimento de maneira brusca, na face quente dos tijolos. As regiões mais expostas ao ar atmosférico são mais sujeitas ao efeito do choque térmico, especialmente em se tratando de operação descontínua. O resultado é a ocorrência de trincas e lascamentos dos tijolos, o que muitas vezes torna-se causa do baixo desempenho dos refratários.

O método de teste proposto, justamente baseado na forma de desgaste comentada anteriormente, visa provocar a destruição dos corpos de prova, através de lascamentos sucessivos.

4.2 - Procedimento Experimental

Utiliza-se um forno do tipo mufla que atinge uma temperatura de 1200°C . A porta do forno é substituída por uma parede de refratário isolante com quatro orifícios por onde penetram os corpos de prova (4) tal como mostrado na figura 4. Os corpos de prova (CP's) de $120\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ são posicionados como mostrado na figura 5 e aquecidos até 1200°C onde permanecem por 1/2 hora. Após isso, iniciam-se os ciclos de choque térmico. Os CP's são resfriados de modo que sua extremidade aquecida entra em contacto com a água durante 3 minutos, segundo esquema mostrado na figura 6. Em seguida o conjunto é deixado ao ar cerca de 3 minutos, após o que retorna ao forno por mais 25 minutos. O ciclo se repete.

Durante o tempo em que os CP's estão sendo resfriados em água, os orifícios (4), na parede de refratário isolante, montada em substituição à tampa do forno, são preenchidos com refratários de mesma qualidade evitando-se queda de temperatura no forno.

4.3 - Avaliação de Resultados

Após um determinado número de ciclos, os corpos de prova são fotografados em conjunto e avaliados através de uma escala de desgaste. A figura 7 mostra o resultado de um teste conduzido em materiais refratários cujas características são apresentadas no quadro I. A redução no comprimento das amostras passa a ser usada como critério de comparação dos produtos testados, sendo os resultados apresentados como percentagem de desgaste ou simplesmente como desgaste em mm/ciclo. Por outro lado, padrões fotográficos de interpre-

tação simples são usados na documentação desses resultados.

QUADRO I - Características dos materiais testados

CARAC TERÍSTICAS	FABRICANTE	A	B	C	D
	TIPO	ALTA-ALUMINA	MAGNÉSIO-CROMÍTICOS		
MgO		-	59,0	69,0	72,0
Cr ₂ O ₃		-	20	12,5	15,0
SiO ₂		9,0	1,5	1,8	-
Al ₂ O ₃		90,0	10,5	7,8	8,0
Fe ₂ O ₃		0,09	9,3	7,0	3,5
Densidade aparente (g/cm ³)		2,98	3,3	3,15	3,25
Porosidade aparente (%)		14,0	14,0	14,5	12,3

5. CONCLUSÕES

O método de teste de choque térmico apresentado envolve um procedimento simples, que permite comparar relativamente a resistência ao choque térmico de muitos tipos de refratários ao mesmo tempo, baseando-se na avaliação de seu desgaste após lascamentos sucessivos. O gradiente de temperatura ao longo dos corpos de prova, durante seu aquecimento, simula bem as condições operacionais usuais.

O método descrito não deve ser considerado completamente desenvolvido. Entretanto, pode-se notar que como já se apresenta, permite a comparação da resistência ao choque térmico de diferentes materiais refratários de uma forma quantificada.

Embora tenha sido desenvolvido para uma condição de aplicação específica - operação intermitente, envolvendo contacto do revestimento com banho metálico a elevadas temperaturas e resfriamento sucessivo - acredita-se que poderá vir a ser relevante no desenvolvimento de produtos para outras aplicações, onde o lascamento por choque térmico apresente-se como causa de desgaste do refratário.

BIBLIOGRAFIA

- (1) - CAMPOS LÓRIZ, D. - Caracterización de los refractários. Rev. Met. CENIM 16(4): 229 - 236, 1980.
- (2) - COPPACK, T.J. - A method of thermal cycling refractories and an appraisal of its effects by a non-destructive technique. Trans. J. Brit. Ceram. Soc. 80(2): 43 - 46, 1981.
- (3) - SEMLER, C.E. - Modified prism spalling test evaluates thermal shock resistance. Refractories Journal: 12 - 17, Jan / Feb. 1981.
- (4) - FERREIRA, W. - Termoclase - observações preliminares sobre um ensaio rápido. Cerâmica, 27(137): 247 - 249, Jun.1981.

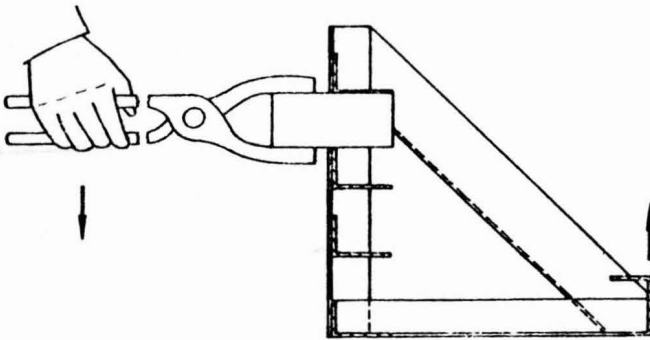


Figura 1 - Método de teste de "spalling".

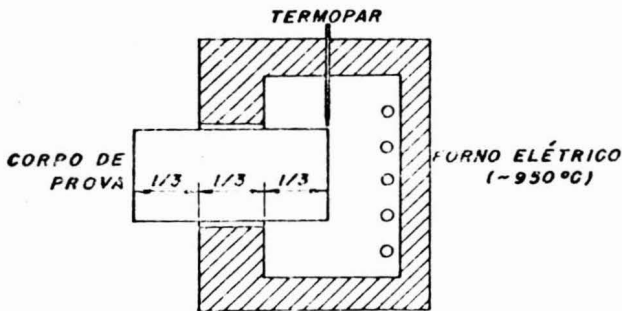


Figura 2 - Aquecimento do corpo de prova.

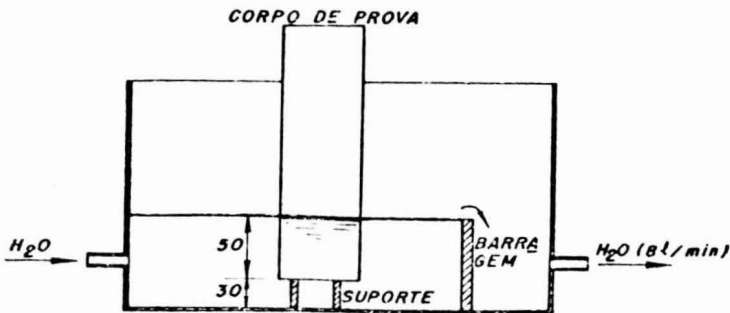


Figura 3 - Esquema de restrição do corpo de prova. (2)

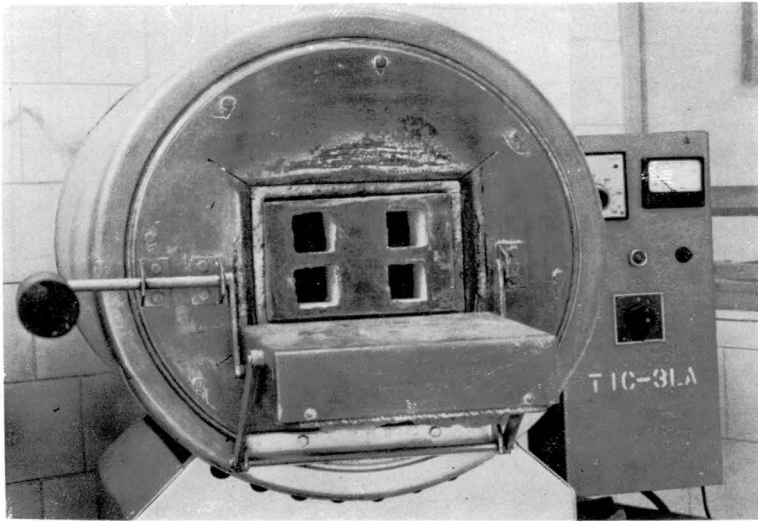


Figura 4 - Forno mufla com modificação na porta para realização do teste.

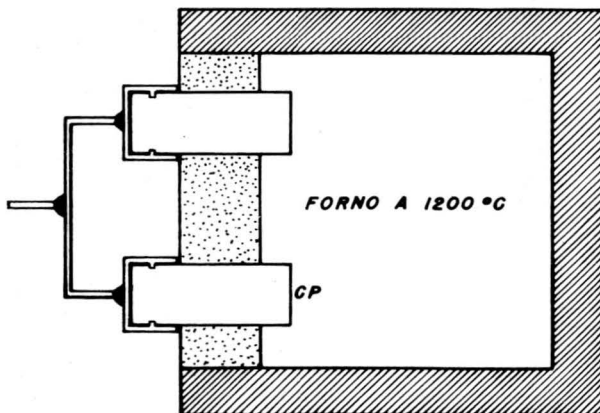


Figura 5 - Posicionamento dos corpos de prova para aquecimento.

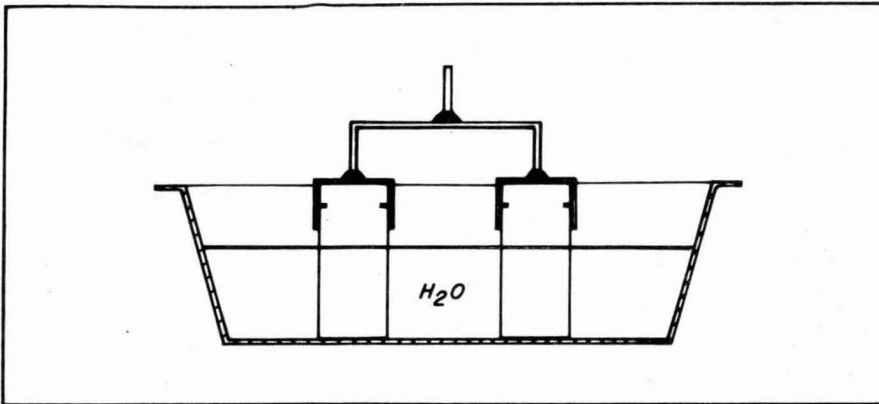


Figura 6- Esquema de resfriamento dos corpos de prova.

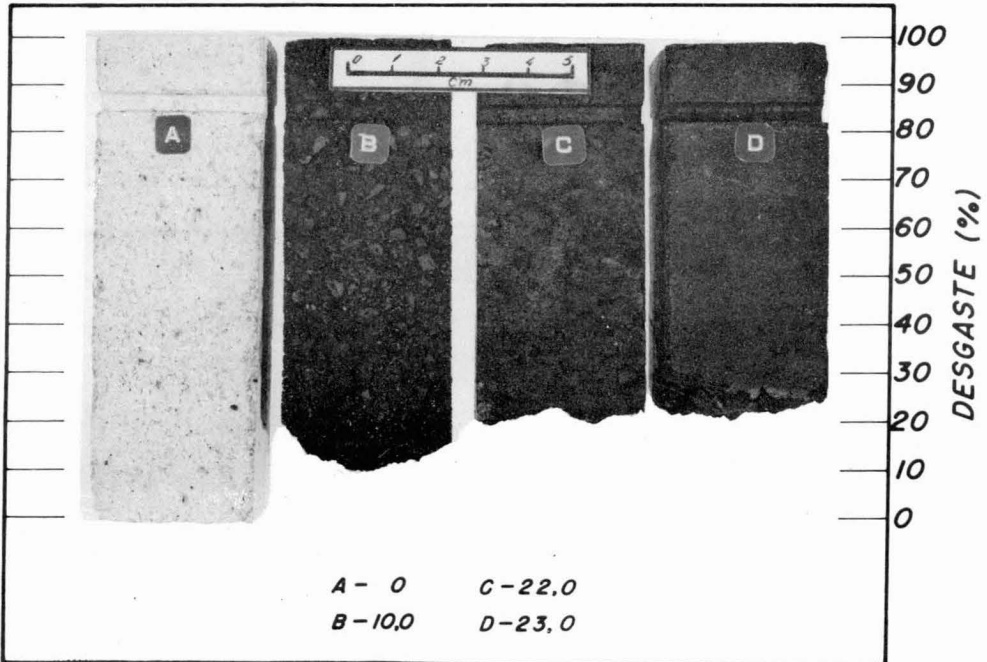


Figura 7-Resultado de teste de choque térmico em materiais cujas características são apresentadas no quadro I.