

APLICAÇÃO DA FERRAMENTA SWOT PARA AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE DANO DO CHOQUE TÉRMICO EM MATERIAIS REFRAATÓRIOS

**L. R. G. Gonçalves¹, G. B. Cintra¹, B.H. Teider², J. B. Gallo²,
V. C. Pandolfelli¹**

¹*Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais - GEMM*

Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos

Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM

Rod. Washington Luiz, km 235, C.P. 676, S. Carlos, SP, 13565-905

²*Alcoa Alumínio S.A.*

Departamento de Aplicações, Desenvolvimentos & VPE

Rod. Poços - Andradas, Km 10, Poços de Caldas, MG, Brasil

lidiaufscar@yahoo.com.br

RESUMO

A literatura indica que há diversos tipos de ensaios e diferentes métodos de avaliação de dano por choque térmico. Adicionalmente sabe-se que, em determinadas aplicações, esse tipo de dano é um dos principais responsáveis pela degradação do revestimento refratário. Dentro deste contexto e buscando a melhor forma de reproduzir as condições em serviço do revestimento refratário, o presente trabalho foi realizado visando analisar qual tipo de ensaios de choque térmico e método de avaliação do dano são os mais adequados para avaliar o desgaste destes materiais. Essa análise foi baseada em uma revisão bibliográfica e resultados obtidos em laboratório, em que se comparou e avaliou as vantagens e desvantagens dos métodos mais relevantes encontrados na literatura. Por fim, com o auxílio da ferramenta SWOT foi possível avaliar se o método adotado pelos autores desse trabalho é adequado para auxiliar na seleção do refratário para aplicação em calcinadores de leito fluidizado.

Palavras-chave: choque térmico, refratários e SWOT.

INTRODUÇÃO

A análise SWOT, cujas siglas significam Strengths (pontos fortes), Weaknesses (pontos fracos), Opportunities (oportunidades) e Threats (ameaças), é uma ferramenta muito utilizada por empresas na busca por orientações estratégicas. Seus pontos fortes e fracos são determinados por elementos internos, enquanto as oportunidades e riscos são ditados por forças externas, o que permite sistematizar todas as informações possíveis e, após uma análise cuidadosa, tomar uma decisão balanceada. No meio científico essa ferramenta pode ser uma alternativa eficaz para analisar se um método de medida adotado é adequado para a aplicação em questão.

O desgaste por choque térmico, assunto estudado no presente trabalho, é de grande importância técnica e econômica, já que em muitos casos, se trata de um dos principais responsáveis pela degradação do material refratário. Um exemplo prático que reproduz essas condições é o revestimento refratário de calcinadores de leito fluidizado usados na indústria de alumínio durante a etapa de calcinação, que visa a transformação de hidróxido em óxido de alumínio.

São conhecidos diversos tipos de ensaios de choque térmico. Abaixo segue uma breve descrição dos métodos mais relevantes destacando as respectivas vantagens e desvantagens.

A. Forno com câmara dupla (Usiminas)

Este método utiliza um forno elétrico tubular contendo duas câmaras com temperaturas distintas e atmosfera controlada (Fig. 1).

As amostras (150 mm x 30 mm x 30 mm, pré-queimadas) são aquecidas em uma das câmaras e posteriormente são automaticamente transferidas para a outra com temperatura inferior, onde são resfriadas utilizando-se um fluxo de gás nitrogênio, gerando assim um gradiente de temperatura.

No caso da Usiminas, são realizados um total de 6 ciclos (aquecimento a 1100°C e resfriamento a 400°C, por exemplo), sendo que após 1, 3 e 6 ciclos são medidas as variações nas propriedades mecânicas, causadas pela degradação por choque térmico⁽¹⁻³⁾.

A avaliação do dano sofrido é realizada por medição do módulo elástico (MOE) e do módulo de ruptura a temperatura ambiente (MoR), além da avaliação visual.

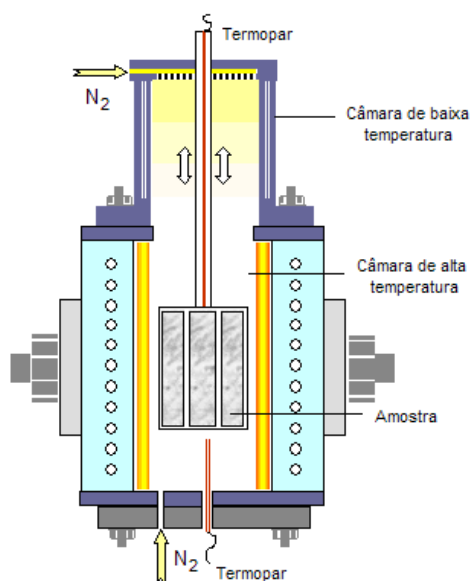


Fig. 1: Forno de câmara dupla⁽¹⁾.

Como vantagens esta técnica apresenta a independência do fator humano (altamente automatizado), praticidade, ampla variedade de alternativas para o gradiente de temperatura, opção de adotar uma temperatura final que seja diferente da temperatura ambiente, possibilidade de controle de atmosfera (possibilita ensaios em materiais contendo carbono) e avaliação quantitativa do dano.

As desvantagens que esse método apresenta é o fato de ainda não ser normalizado, a dificuldade de monitoramento da degradação em função do número de ciclos (quando a temperatura inferior for superior a temperatura ambiente) e a dificuldade de implementação (automatização, investimento inicial e dimensões).

Concluindo, se trata de um método muito prático e preciso que permite representar muito bem as variações de temperatura encontradas nas aplicações industriais. Porém, apresenta limitação na comparação de resultados (por ser um equipamento único) e o fato de ainda não estar normalizado podem resultar em uma difícil aceitação imediata.

B. Ribbon Test

Neste teste, as amostras (228 mm x 63,5mm x 63,5mm, separadas por uma distância de 6 mm) são alinhadas de forma que uma das suas faces seja submetida

a uma chama contínua de gás quente, gerada por um maçarico (Fig. 2). A temperatura desta chama é rigorosamente controlada apresentando um desvio de no máximo 5°C. A distancia entre as amostras e a chama de gás geralmente é de 127 mm, podendo ser ajustada, se necessário.



Fig. 2: Equipamento para Ribon test⁽³⁾.

O ribbon teste consiste em um método cíclico, no qual para o aquecimento são utilizados maçaricos e para o resfriamento são utilizados jatos de ar comprimido. Cada ciclo é de 30 minutos, sendo que 15 minutos correspondem ao aquecimento (815 a 1100°C) e o restante ao resfriamento, caracterizando uma variação brusca de temperatura. Os danos gerados são analisados por meio de variações das propriedades mecânicas que são medidas antes e depois dos ciclos térmicos⁽³⁻⁶⁾.

O dano sofrido é avaliado pela medida do Módulo Elástico (MOE), resistência mecânica (MOR) e também pela avaliação visual.

Apresenta como pontos positivos o fato de permitir a geração de gradientes de temperatura ao longo do corpo de prova, avaliação quantitativa do dano, por gerar um dano severo e é um método automatizado. Entretanto é um equipamento relativamente caro, com maior possibilidade de ser realizado em escala industrial, além de necessitar de experiência técnica, gastos com energia e não possibilitar o controle da atmosfera (não adequado a materiais contendo carbono) além de já ter sido eliminado das normas ASTM (2005).

Atualmente é uma técnica alternativa para ser utilizada em empresas para a seleção e comparação de desempenho de diferentes materiais refratários(ex. ASTM C1100-88).

C. Panel Spalling Test

Este método consiste basicamente em revestir internamente a porta de um forno (Fig. 3) com o material a ser ensaiado. O aquecimento é efetuado enquanto o forno encontra-se fechado e o resfriamento acontece com a abertura da porta.



Fig. 3: Equipamento para Panel Spalling tests⁽³⁾.

Trata-se de um ensaio que foi muito utilizado principalmente nos EUA e no Japão. Nos EUA as amostras (tijolos de 450 mm x 890 mm x 110 mm) eram submetidas a 10 ciclos de 20 minutos cada, nos quais se aquecia a 1400°C por 10 minutos e em seguida eram resfriadas por spray de água. No Japão (amostras de 150 mm x 150 mm x 150 mm), o aquecimento era realizado até 1700°C durante 6h, seguido por um patamar de 8h e então um resfriamento a 400°C. Posteriormente o mesmo procedimento era repetido, porém com resfriamento a 200°C².

A severidade do dano é proporcional a variação da massa em função do número de ciclos (EUA) ou pelo monitoramento do módulo elástico por emissão acústica (Japão).

A principal vantagem apresentada por esse método era o fato de ser normalizado (ASTM C-38 e C-107), porém o mesmo já foi eliminado da ASTM em 1994. Já as desvantagens apresentadas são inúmeras, o fato de ser impreciso na avaliação de refratários com maior resistência ao dano por CT, da impossibilidade de controle de atmosfera, da necessidade das amostras serem pré-queimadas, apresentar um resfriamento muito lento (quando natural) e provável dano ao forno.

Atualmente se trata de um método pouco viável, pois além de ser indicado para materiais muito específicos, nem sempre o dano por choque térmico provoca perda

de massa, o que torna inviável o método de medida em questão caso não se utilize a monitoração do dano por emissão acústica.

D. Prism Spalling Test (adaptado pelo GEMM-UFSCar)

Este método consiste em aquecer os corpos de prova, utilizando fornos elétricos com temperatura entre 900 e 1200°C, por 15 minutos e em seguida resfriá-los por imersão em água (Alemanha e Japão), exposição ao ar (EUA, Alemanha e GEMM-UFSCar) ou deposição em uma placa de metal refrigerada (Magnesita/Brasil), provocando assim uma variação brusca de temperatura^(2,7).

A técnica utilizada no GEMM-UFSCar é baseada neste método (Fig. 4). Amostras com dimensões próximas à 150 mm x 25 mm x 25 mm são submetidas a uma variação de temperatura que é resultado de um aquecimento a aproximadamente 1000°C e resfriamento ao ar. Cada ciclo consiste de 15 minutos de aquecimento e 15 minutos de resfriamento. No total, cada corpo sofre 10 ciclagens térmicas. Para avaliar o dano sofrido é medido o módulo elástico inicial e após 3, 6 e 10 ciclos pelo método não destrutivo de ressonância de barras, e ao fim de 10 ciclos, mede-se a resistência mecânica residual.

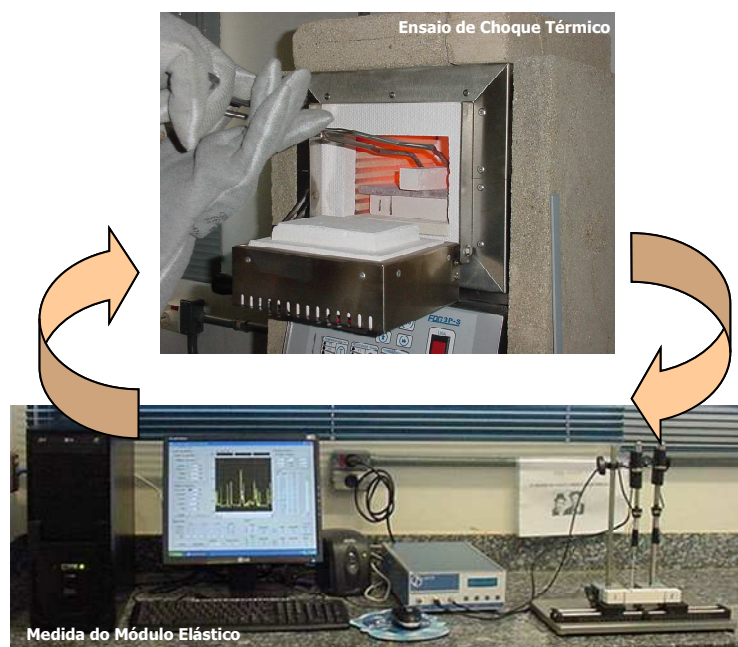


Fig 4: Equipamento utilizado no GEMM-UFSCar.

São várias as vantagens relacionadas a esse método, dentre elas o fato de ser normalizado (ASTM C-1171), de permitir o acompanhamento do dano sofrido (MOE

versus número de ciclos) e a avaliação quantitativa do dano (MOE *versus* ciclo / %MOE *versus* número de ciclos), a praticidade e o custo relativamente baixo.

Porém, também apresenta algumas desvantagens, como a limitação da temperatura do forno (1100-1200°C), a impossibilidade de controlar a atmosfera e o fator humano, uma vez que exige treinamento do operador.

Portanto, este método possui fácil aplicação e permite a análise comparativa entre as composições de maneira eficiente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como comentado anteriormente, o uso da ferramenta SWOT permite uma análise sistemática por meio da identificação dos pontos fortes (S) e fracos (W), bem como das oportunidades (O) e ameaças (T), que quando interconectados fornecem uma base sólida na tomada de uma decisão. No presente trabalho, a análise foi realizada com base no procedimento de medida adotado pelo GEMM-UFSCar, atribuindo como fatores internos todas as vantagens e desvantagens discutidas anteriormente, e os fatores externos como sendo as características de aplicação do calcinador para a indústria de alumínio e do processo de seleção do revestimento. Assim, utilizando essa ferramenta, foi possível cruzar as informações do que se tem (método GEMM) com o que se deseja ter (selecionar o refratário mais adequado em relação ao CT para aplicar em calcinadores).

De acordo com a análise SWOT (a seguir), o método utilizado pelo GEMM-UFSCar apresenta importantes pontos positivos (destacados em verde), como o fato de ser normalizado, de o método de medida permitir um acompanhamento do dano e por possibilitar a classificação de acordo com o desempenho, de forma prática e confiável. Como o propósito desse trabalho é determinar o método mais adequado para a seleção de materiais, dentre os métodos existentes esse é extremamente vantajoso quando se trata de um processo classificatório.

Observaram-se também alguns pontos negativos (destacados em vermelho). No caso do item A-6, a limitação pode ser eliminada utilizando um forno que opere a temperaturas superiores, próximas a 1250°C. A implicação B-8 pode ser minimizada com treinamentos das pessoas que irão operar o equipamento. O fato do método não representar as variações de temperatura causadas devido à necessidade de diferentes campanhas (A-10), indica que o método da Usiminas seria o mais

adequado pelo fato de possibilitar uma maior possibilidade de variações de temperatura. Porém, não se trata de uma limitação, pois, como foi comentado no

		FATORES INTERNOS	
		Strengths 1. Normalizado (ASTM C-1171); 2. Permite acompanhamento do dano sofrido (MOE vs nº de ciclos); 3. Praticidade; 4. Custo relativamente baixo; 5. Severa variação de temperatura.	Weaknesses 6. Limitação do forno (1100°C); 7. Impossibilidade de controlar a atmosfera; 8. Fator humano; 9. Corpos aquecidos como um todo; 10. Temperatura inferior necessariamente igual a temperatura ambiente; 11. Corpo de prova com volume restrito.
FATORES EXTERNOS	Oportunities A. Conhecimento das condições de trabalho; B. Classificar diferentes tipos de refratário.	S-O Implications A-3 : De uma forma simples é possível representar bem as condições de aplicação. B-1 : Confere maior credibilidade internacional e atende uma necessidade global da empresa; B-2 : Possibilidade de determinar um ranking de desempenho, indicando os refratários mais adequados.	W-O Implications A-6 : Dependendo das condições de uso, a temperatura de aplicação pode ser superior a máxima temperatura do forno; A-7 : Refratários usados em calcinadores não necessitam de controle de atmosfera; A-9 : Diferença no perfil térmico nos testes de laboratório e na aplicação; B-8 : Fator humano pode reduzir a precisão da medida e comprometer a comparação; B-11 : O tamanho da amostra não influencia o ranking obtido desde que o volume dos corpos de prova seja o mesmo para todos os materiais testados.
	Threats C. Temperatura de operação variável; D. Necessidade de reparos que forcem resfriamento brusco.	S-T Implications C-5/D-5 : As condições de ensaio são mais críticas que as condições de operação.	W-T Implications A-10 : Não representa as variações de temperatura causadas durante diferentes campanhas.

Pontos destacados em verde: vantagens.

Pontos destacados em vermelho: desvantagens.

item C-5/D5, as condições de ensaio do método GEMM-UFSCar são mais críticas que as condições de operação, ou seja, o dano causado por um gradiente de temperatura cuja temperatura inferior é igual à temperatura ambiente provavelmente é mais severo que aquele cuja temperatura inferior encontra-se entre a temperatura ambiente e a temperatura de uso. Logo o aspecto mais relevante é o fato de o corpo de prova não representar o mesmo perfil térmico da parede do calcinador, que apresenta uma face quente e outra fria. Nesse caso o método mais reprodutivo seria o Ribbon Test, porém como discutido anteriormente, esta técnica possui outros inconvenientes e, além disso, já foi excluída pela ASTM. No entanto, é preciso ponderar a relevância desses fatores, determinando se afetam ou não o processo de comparação.

CONCLUSÃO

Os autores do trabalho acreditam que a influência dos aspectos negativos apresentados pelo método analisado não comprometem o propósito principal, que é escolher o revestimento mais adequado para um equipamento industrial, uma vez que os pontos positivos superam amplamente os negativos. Dessa forma o método GEMM-UFSCar pode ser utilizado como ferramenta de medida do dano por choque térmico e considera-se esse método como o mais adequado entre os testes disponíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Alcoa pelo apoio técnico e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. QUINTELA, M.; MELO, T.; LAGE, I.; RODRIGUES, J. and PANDOLFELLI, V. C. "Thermal Shock of Carbon-Containing Refractories", Interceram, Refractories Manual, p. 40-44, 2003.
2. SEMLER, C. E. "Thermal Shock Testing of Refractories – Revisited: Part I", Refractories Applications and News, v.13, n.1, p.18-22, 2008.

3. SEMLER, C. E. "Thermal Shock Testing of Refractories – Revisited: Part II", Refractories Applications and News, v.13, n.2, p.18-24, 2008.
4. ASTM C-1100, "Standard Test Method for Ribbon Thermal Shock Testing of Refractory Materials", 1999 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.01, Refractories; Carbon & Graphite; Advanced Ceramics, p.295-298.
5. SEMLER, C. E. and HAWISHER T. H. "Evaluation of the Thermal Shock Resistance of Refractories Using the Ribbon Test Method", Ceramic Bulletin, v.59, n.7, p.732-738, 1980.
6. SEMLER, C. E. Jr.; HAWISHER, T. H. and BRADT, R. C. "Thermal Shock of Alumina Refractories: Damage-Resistance Parameters and the Ribbon Test", Ceramic Bulletin, v.60, n.7, p.724-729, 1981.
7. ASTM C-1171, "Standard Test Method for Quantitatively Measuring the Effect of Thermal Cycling on Refractories", 1999 Annual Book of ASTM Standards, Refractories; Carbon & Graphite; Advanced Ceramics, v.15.01, p.316-318.

SWOT AS A TOOL TO EVALUATE THE THERMAL SHOCK DAMAGE TECHNIQUE OF REFRACTORY MATERIALS

ABSTRACT

The literature shows that there are different tests and techniques for evaluating the thermal shock damage. Additionally, it is known that, for certain applications, this type of wear mechanism is one of the main causes of fluid flash calciner refractory degradation. Within this context and in order to find the best way to reproduce the refractory lining service conditions, this work was carried out to select which thermal shock test and damage assessment method are more suitable to evaluate these materials. This analysis was based on a literature review and laboratory experiments, comparing and evaluating the advantages and disadvantages of the most important methods available in the literature. Finally, with the help of the SWOT tool it was possible to evaluate whether the method adopted by the authors of this work is appropriated to help the selection of the refractory for calciners application.

Key-words: thermal shock, refractories e SWOT.