

## AVALIAÇÃO TEÓRICA DA FADIGA TÉRMICA EM ALUMINA

Túlio Pinaud Madruga, UFRGS, EE-DEMAT-Av. Osvaldo Aranha 99/705 CEP90.035-190 Porto Alegre  
e-mail: gmadruga@vortex.ufrgs.br

Carlos Pérez Bergmann, UFRGS, EE-DEMAT-Av. Osvaldo Aranha 99/705 CEP90.035-190 Porto Alegre  
e-mail: bergmann@vortex.ufrgs.br

José Carlos Bressiani, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-Travessa R 400-USP-São Paulo  
e-mail: jbressiani@met.ipen.br

### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo teórico sobre o ciclamento térmico de aluminas, enfocando o estado de tensão na extremidade de uma trinca associado ao fenômeno. Também analisa a influência da microestrutura nas propriedades que determinam uma maior resistência à fadiga cíclica, a partir da consideração dos possíveis mecanismos envolvidos.

Palavras-chave: Materiais cerâmicos, fadiga térmica, alumina.

### INTRODUÇÃO

A maioria das aplicações industriais para a alumina (certamente o material cerâmico com o mais amplo campo de aplicação técnica) envolve esforços termomecânicos devido à variação de temperatura. Esta variação poderá ser catastrófica, caracterizando uma condição de choque térmico, quando a energia absorvida pelo material ultrapassa sua capacidade de armazenar energia elástica. O excesso de energia é liberado na propagação de uma trinca, provocando a degradação da resistência mecânica do material. Se a energia envolvida na variação da temperatura for menor do que a capacidade do material em absorvê-la elasticamente, ocorrerá apenas o estabelecimento de uma tensão mecânica de origem térmica. A repetição continuada de aquecimentos e resfriamentos em situações não catastróficas originam um processo de fadiga térmica.

Embora a importância da alumina como material de engenharia e as solicitações de fadiga térmica como inerentes à maioria das condições de emprego deste material, a literatura técnica a respeito é bastante diminuta. Portanto, considerações teóricas a respeito de mecanismos atuantes no fenômeno podem assim, ajudar a definir fatores que determinam uma maior ou menor susceptibilidade à essa solicitação termomecânica.

### ESFORÇOS TERMOMECÂNICOS CÍCLICOS

O efeito da variação de temperatura sobre a resistência mecânica de alumina sinterizada é por demais conhecido, haja visto que placas de fornos

### ABSTRACT

This paper presents a theoretical study on thermal cycling for aluminas regarding the stress state in the crack tip associated to the phenomena. The influence of the microstructure on the thermal fatigue resistance was also investigated considering some extrinsic and intrinsic mechanisms of cyclic fatigue crack growth in ceramics.

Key words: Ceramic materials, thermal fatigue, alumina.

deste material apresentam rachaduras após alguns anos de funcionamento. O fenômeno, provavelmente devido à fadiga térmica, é ainda desconhecido quanto ao seu mecanismo. O fato de não se saber com rigor seu mecanismo impede uma eficiente determinação de microestruturas e composição que permitam otimizar a resistência à fadiga de aluminas.

A idéia de que cerâmicas eram insensíveis à fadiga foi abandonada já a alguns anos. A fadiga térmica constitui uma nova expectativa uma vez que está associada à fadiga cíclica, já que não há por que diferenciar a tensão de origem térmica da de origem mecânica. Na realidade, a variação de temperatura provoca no corpo cerâmico um estado de tensão que alterna tração e compressão, como pode ser visto na Figura 1.

Como se pode notar, a superfície do material é a parte mais afetada já que nela se observa o maior valor da tensão. Portanto, aí deverá localizar-se a maior resistência ao esforço termomecânico.

### COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DA ALUMINA

Aluminas são considerados materiais de alta fragilidade onde o principal fator que propicia a propagação de trincas está baseado na ruptura das ligações. Ocorrerá fratura sempre que a energia elástica cedida ao corpo for maior que a sua capacidade de absorvê-la. Isto porque os mecanismos de deformação plástica estão praticamente ausentes a temperatura ambiente, devido à imobilidade das discordâncias em baixas temperaturas. A medida que a temperatura é aumentada, sistemas de deslizamento começam a ser ativados. A alumina- $\alpha$  (corindon) possui um arranjo de

ions  $O^{2-}$  formando uma estrutura hcp e ions  $Al^{3+}$  em duas de cada três posições octaédricas existentes, dando desta forma uma relação de 2:3 entre número de cátions e ânions.

Para se formar uma discordância na estrutura da alumina- $\alpha$  há necessidade de altas energias e, para movimentá-las, é necessário que estejam ativos no mínimo cinco sistemas de deslizamento. Como resultado, estes mecanismos raramente estão disponíveis para que deformações plásticas ocorram. O plano basal, por exemplo, fica ativo em temperaturas da ordem de 900°C.

A condição para que estejam ativos cinco sistemas de deslizamento em alumina só é atendida em temperaturas maiores do que 1200°C, com a ativação dos planos piramidal e prismático. Nesta situação, a resistência à fratura é determinada pela tensão proporcionada pelas ligações químicas.

Para os materiais cerâmicos, os defeitos microestruturais existentes exercem extrema importância em relação ao comportamento mecânico, uma vez que: i) não precisam ser grandes para afetar significativamente a resistência mecânica; ii) os defeitos superficiais são os de maior influência e iii) os defeitos estão aleatoriamente distribuídos no material<sup>(1)</sup>.

Vários mecanismos são comentados<sup>(2)</sup> para explicar a influência dos defeitos microestruturais na resistência mecânica, porém é importante ressaltar que as alterações no comportamento mecânico de materiais frágeis são diretamente proporcionais ao aumento da temperatura.

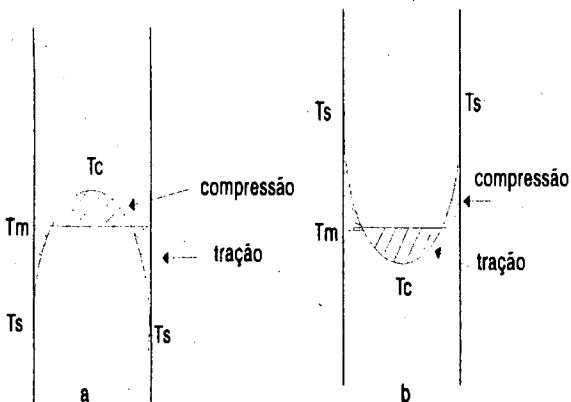


Figura 1. Estado de tensão em uma placa submetida a a) resfriamento e b) aquecimento.

O exame micrográfico de fraturas em cerâmicos evidencia sua complexidade mórmente por serem parcialmente transcristalinas e intercristalinas e pela sua natureza volumétrica, embora seja habitual dar tratamento planar aos defeitos responsáveis pelo fenômeno. Sem a presença de defeitos, a resistência na

ponta da trinca, aguda, se aproxima do valor de sua resistência teórica e a pequena zona em sua vizinhança fica sujeita a um campo de tensão que muitas vezes ultrapassa à tensão resistente.

Em temperaturas mais elevadas toma lugar uma plasticidade limitada devido à possibilidade de movimentação de discordância, deslizamento de contorno de grão ou ainda por amolecimento de fase vítrea, que ocorre na faixa de 800-900 °C.

## MECANISMOS DE FADIGA

Dauskardt<sup>(3)</sup> propôs um modelo para a fadiga considerando um mecanismo de desgaste provocado por fricção numa estrutura onde os grãos se separam parcialmente, deixando com que alguns deles formem uma ligação na forma de ponte, como mostrado na Figura 2.

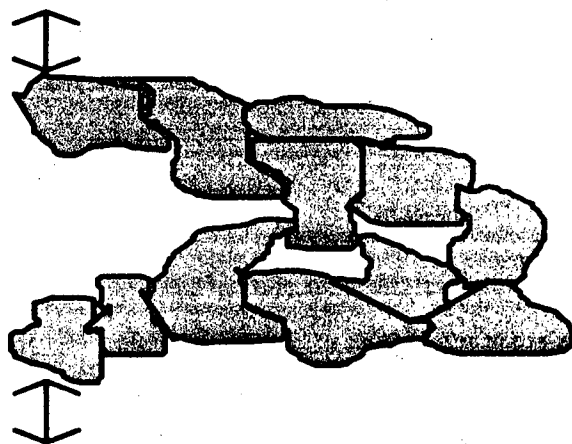


Figura 2. Mecanismo de crescimento de trincas onde os grãos formam pontes entre si que vão se abrindo, ao serem submetidos a cargas cíclicas<sup>(3)</sup>.

Com a aplicação de cargas cíclicas, a abertura e fechamento da trinca resulta em um decréscimo da tenacidade à fratura na zona de ligação por pontes, por redução do estado de tensão nos grãos que formam a ponte.

A premissa básica do modelo de fricção-desgaste que resulta na formação de pontes, está fundado em que o deslizamento que ocorre entre os grãos da ponte reduzem o estado de tensão compressiva do sistema. Este estado de tensão é criado durante o resfriamento do corpo cerâmico. No aquecimento, espera-se que haja uma inversão do estado de tensão. Desta forma, supõe-se que ocorra uma movimentação das paredes dos grãos, gerando uma tensão de atrito descrita pela Equação 1.

$$p(u) = \mu \sigma_R (1 - u/u^*) \quad (1)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de fricção,  $\sigma_R$  é tensão residual,  $u$  corresponde a metade da distância de abertura da trinca e  $u^*$  corresponde a distância máxima de abertura da trinca, crítica para a ruptura da ponte, conforme mostrado na Figura 3.

#### INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA PRESENÇA DE FASE VÍTREA

De uma maneira geral, pode-se avaliar a variação da resistência mecânica da alumina com a temperatura através da Figura 4.

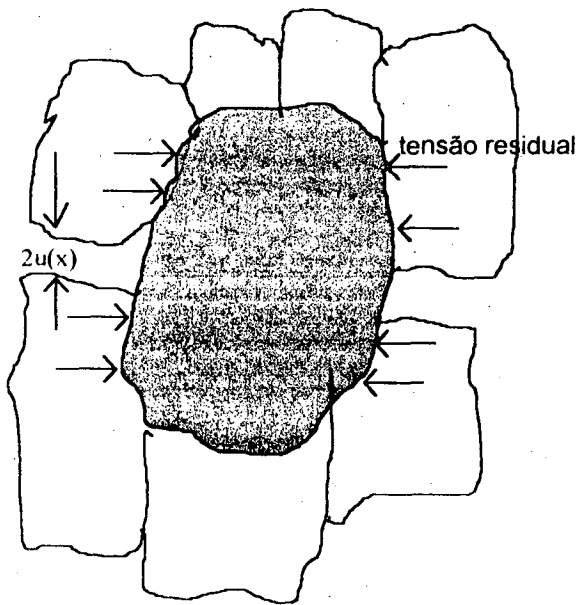


Figura 3: Visualização do mecanismo de ponte, mostrando o caso de um grão sendo tensionado durante a fase de aquecimento<sup>(3)</sup>.

A região A é nitidamente uma região de fratura frágil, onde a resistência mecânica é controlada pelos defeitos extrínsecos ou intrínsecos pré-existentes no material. Uma pequena queda pode ser observada devido à diminuição de valores de parâmetros da equação básica com o aumento da temperatura. Na região B ocorre ainda um mecanismo de fratura frágil com uma tendência ao aumento dos defeitos pré-existentes e a formação de outros defeitos. Por ocorrer também, fluência por difusão e mesmo deslizamento do contorno de grão. Na região C, onde a elevada temperatura permite a movimentação de discordância, o fenômeno é similar ao de metais com a ocorrência de deformação plástica.

A ação simultânea de temperatura e tensão permitiria a ocorrência de um coalescimento de poros, conforme os estágios mostrados na Figura 5.

Em aluminas contendo fase vítrea, dois efeitos podem ser evidenciados. Primeiramente o espetacular efeito que Davidge<sup>(4)</sup> verificou, estudando aluminas contendo aproximadamente 10% de fase vítrea, onde, para temperaturas na ordem de 800°C, observou um substancial aumento (cerca de 50%) da resistência mecânica, porém numa pequena faixa de temperatura.

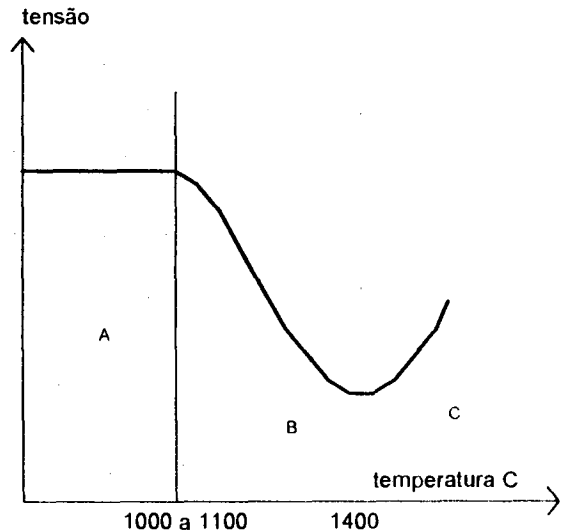


Figura 4. Variação da resistência mecânica com a temperatura. Em A, fratura frágil, em B fratura frágil com aumento de defeitos pré-existentes e mesmo criação de outros defeitos e em C ocorrência de deformação plástica, pela movimentação de discordância.

Davidge associou o aumento de resistência verificado à plasticidade da fase vítrea. A explicação foi de que a viscosidade da fase vítrea permite uma redução localizada da tensão no entorno da ponta da trinca, aumentando efetivamente a energia da superfície através do aumento do raio de curvatura da ponta da trinca. Com o aumento da temperatura, verifica-se uma diminuição da resistência mecânica devido ao deslizamento do contorno de grão, promovido pela fase vítrea.

Efeito semelhante foi verificado por Madruga<sup>(5)</sup> que, ao investigar a recuperação de defeitos pelo seu preenchimento com fase vítrea, observou um aumento de cerca de 20% da resistência mecânica final, comparando peças com fase vítrea tratadas com outras, sem fase vítrea. O tratamento de recuperação de trincas constituiu-se basicamente em se elevar a temperatura até valores onde fosse permitido o

escoamento da fase vítrea para a ponta da trinca, diminuindo seu tamanho (Figura 6 e 7).

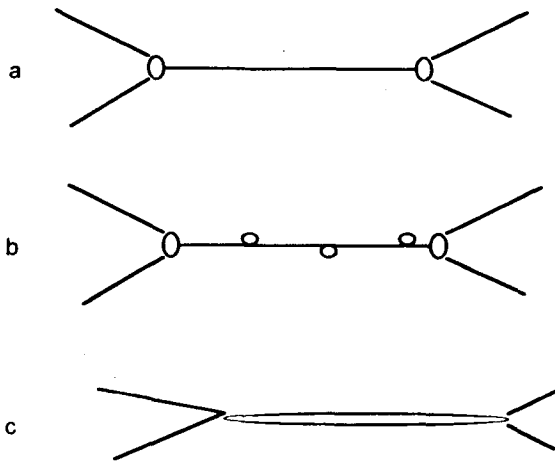


Figura 5. Influência do efeito simultâneo da tensão e temperatura, mostrando em a a nucleação de defeitos nos pontos triplês, em b formação de novos poros e em c coalescimento e criação dos poros, formando uma fenda estreita entre os dois poros.

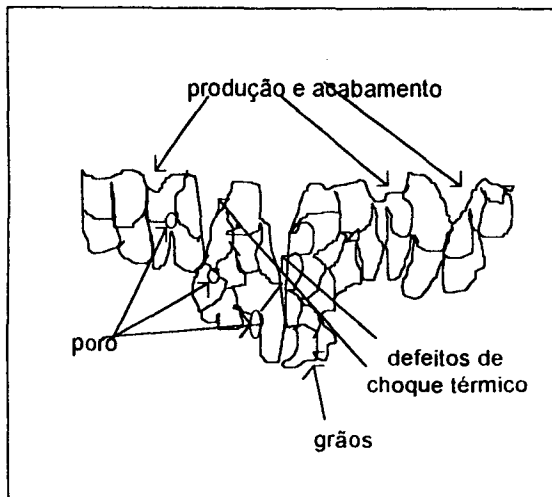


Figura 6. Aspecto da superfície de uma alumina submetida a choque térmico<sup>(5)</sup>.

## CONCLUSÃO

A caracterização teórica da fadiga térmica carece de maiores informações, mormente sobre aluminas. É necessário considerar entretanto que a maioria das fraturas que ocorrem em materiais, sejam cerâmicos ou metálicos, são devidos a fenômenos de

fadiga e que o desconhecimento de seus mecanismos não fornecem possibilidades maiores de definir parâmetros do material ou microestruturais para otimizar seu comportamento frente a tão grande desafio. Algumas recomendações como reforço por segunda fase ou reforço por fibras ou plaquetas são conhecidas e difundidas no meio técnico. Entretanto, é pouco provável que as curvas de fadiga com estes reforços tenham sido ainda levantadas.

Assim, pode-se concluir que a fadiga térmica é um assunto que necessita de maiores conhecimentos e que tais conhecimentos são da mais alta importância, uma vez que permitirão otimizar a resistência de aluminas a um esforço termomecânico tão crítico como freqüente.

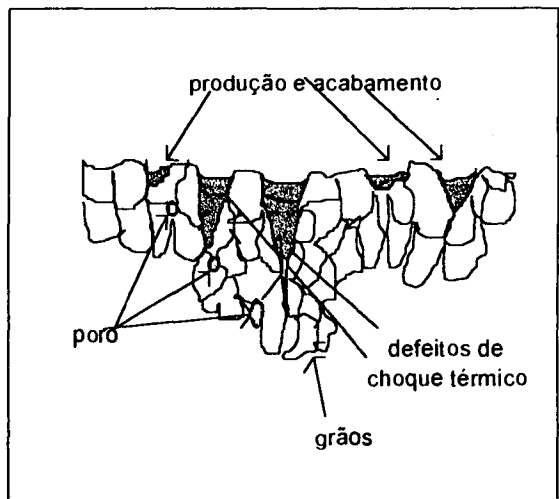


Figura 7. A microestrutura anterior, após tratamento de recuperação onde alguns defeitos foram preenchidos pela fase vítrea (área escura)<sup>(5)</sup>.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) LAW, B.R. and WILSHAW, T.R., Fracture of Brittle Solids, Cambridge University Press, Cambridge, 1975.
- (2) MADRUGA, T.P., Considerações sobre Mecanismos de degradação da Resistência Mecânica de Alumina sob Alta Umidade. In: Anais do 7º Encontro Nacional da Sociedade Portuguesa de Materiais, V.2, p.196-199, 1995.
- (3) DAUSKARDT, R.H., A Frictional Wear Mechanism for Fatigue-Crack Growth in Grain Bridging Ceramics. Act. Metall. Mater., vol 41, nº 9, p. 2765-2761, 1993.
- (4) DAVIDGE, R.W., Mechanical Behaviour of Ceramics, Cambridge Press University, 1979.
- (5) MADRUGA, T.P., Estudo dos Danos Produzidos por Choque Térmico em duas Aluminas, Dissertação de Mestrado, IME, 1982.