



Tema: Materiais cerâmicos, compósitos e poliméricos

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DA ALUMINA (Al_2O_3) ENTRE 23°C E 850°C UTILIZANDO DISPOSITIVO AUTOCOMPENSADOR*

Gustavo Henrique Bolognesi Donato¹

Lucas Bertolli Parra²

Fernando dos Santos Ortega³

Paulo Eduardo Batista de Mello¹

Resumo

A utilização de materiais cerâmicos em componentes que operam em elevadas temperaturas (p. ex.: trocadores de calor cerâmicos que operam acima de 800°C) é vantajosa do ponto de vista térmico, mas não é trivial em termos estruturais, uma vez que estes materiais são frágeis e portanto, suscetíveis à fratura catastrófica. Considerando a necessidade de materiais resistentes a elevadas temperaturas e que garantam a integridade de aplicações como tais trocadores de calor, este trabalho investiga as propriedades mecânicas da alumina α (Al_2O_3) como função da temperatura na faixa de 23°C a 850°C. Para tal, cem ensaios de flexão em 4 pontos e ensaios adicionais selecionados em 3 pontos foram realizados em amostras de seção transversal retangular de $\sim 45 \text{ mm}^2$ produzidas por gelcasting, técnica esta que tem grande potencial para moldar peças de geometria complexa. Os ensaios foram conduzidos empregando um dispositivo fabricado em Inconel (superliga de Níquel-Cromo) especialmente desenvolvido para esta finalidade e contendo articulações objetivando autocompensação de desalinhamentos. Os resultados experimentais puderam ser muito bem descritos usando a estatística biparamétrica de Weibull e demonstram o efeito da temperatura na redução da resistência à flexão. Adicionalmente, o dispositivo proposto facilitou e dinamizou a realização dos ensaios, além de garantir pequena dispersão das propriedades mecânicas obtidas, especialmente se considerado o micromecanismo frágil de fraturamento desta classe de materiais.

Palavras-chave: Alumina; Flexão de 4 pontos; Dispositivo autocompensador.

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE FLEXURAL STRENGTH OF AN ENGINEERING ALUMINA (Al_2O_3) BETWEEN 23°C AND 850°C EMPLOYING AN AUTOCOMPENSATING DEVICE

Abstract

The application of ceramic materials in components that operate under high temperatures (i.e.: ceramic heat exchangers for temperatures above 800°C) has several thermal and efficiency advantages, however, is not trivial from a structural perspective since those materials are brittle and susceptible to stress-controlled catastrophic failure. This work examines the mechanical properties of an α alumina (Al_2O_3) as a function of temperature between 23°C and 850°C. A hundred 4-point bending and additional selected 3-point bending tests were conducted in samples produced using gelcasting technique with cross sections of $\sim 45 \text{ mm}^2$. A special test device was designed incorporating joints for correcting misalignments and was built using Nickel superalloy to guarantee stiffness and strength under high temperatures. The results show that the mechanical strength of the alumina under investigation could be well described using the bi-parametric Weibull statistics and the effects of temperature could be assessed. In addition, the use of the proposed device made tests easier and faster, yet reducing the scatter on the obtained mechanical properties, in special considering the brittle fracture micromechanism of this class of materials.

Keywords: Alumina; 4-Point bending; Self-compensating test device

¹ Eng. Mecânico, Doutor, Docente do Depto. de Eng. Mecânica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil; gdonato@fei.edu.br.

² Aluno de graduação, Eng. Mecânica, orientado de Iniciação Científica, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

³ Eng. de Materiais, Doutor, Docente do Depto. de Eng. de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais cerâmicos categorizados como de engenharia vem sofrendo expressiva expansão nos últimos anos, especificamente considerando componentes que operam sob condições severas de corrosão, desgaste e elevadas temperaturas. Alguns exemplos típicos são ferramentas de corte, vedações especiais, próteses, insertos de usinagem, componentes de motores ou turbinas aeronáuticas e trocadores de calor que busquem operar em temperaturas superiores a $\sim 800^{\circ}\text{C}$ (as quais impõem algumas restrições a superligas de Níquel e outros materiais metálicos aplicáveis) [1,2]. Este aumento das aplicações é motivado por algumas características de interesse nas cerâmicas técnicas, a saber: alta resistência à corrosão e desgaste, elevada temperatura de fusão, boa rigidez, baixa densidade e custo comparativamente baixo uma vez que a maioria de seus componentes estão disponíveis em abundância na natureza. Para fins de ilustração, alguns exemplos quantitativos se mostram de interesse: i) o módulo de elasticidade específico (obtido dividindo-se o módulo elástico E pela densidade ρ) é em torno de 4 vezes superior para uma alumina técnica (Al_2O_3) se comparada ao aço e ao alumínio; ii) por sua vez a razão entre dureza (H) e módulo elástico (E) resulta na média 8 vezes superior para os materiais cerâmicos se comparados às ligas metálicas [1,3]. Assim, fica evidente que considerando propriedades relativas (específicas), os materiais cerâmicos (com destaque para a alumina em aplicações mecânicas) podem ser opções bastante interessantes desde que o dimensionamento respeite as condições de resistência, rigidez e estabilidade exigidas pelas aplicações.

Dentro do interesse do presente trabalho, a aplicação de cerâmicas de engenharia em trocadores de calor cerâmicos (p. ex.: aplicáveis a turbinas a gás com câmaras de combustão externas [4,5]) é vista como potencialmente vantajosa do ponto de vista térmico, já que a possibilidade de operação com temperaturas mais elevadas proporciona aumentos relevantes de eficiência [6]. Entretanto, tal abordagem não é trivial em termos estruturais, uma vez que estes materiais são frágeis e possuem a resistência mecânica dependente da porosidade e da temperatura. Portanto, são suscetíveis à fratura catastrófica e suas propriedades devem ser bem determinadas para suportar projetos mecânicos acurados. A Figura 1 ilustra um trocador de calor cerâmico feito em alumina no Centro Universitário da FEI. Detalhes podem ser encontrados em [7], mas o componente apresentado sofreu fratura longitudinal no cimento refratário usado para selar o equipamento (Figura 1a) e fratura transversal no corpo (Figura 1b), motivando a presente pesquisa.

Tratando da alumina α estudada neste trabalho, propriedades mecânicas completas são escassas na literatura (se limitam muitas vezes a propriedades de fluência ou efeitos de temperatura na dureza) mas alguns dados úteis podem ser encontrados por exemplo nos trabalhos de Munro [8], Sánchez-González e colaboradores [9] e Auearki [10]. Com atenção às propriedades de resistência mecânica, estes trabalhos indicam (para aluminas de baixa porosidade, $\sim 0,5\%$) tensão limite de resistência na flexão (σ_{LR}) em torno de 350 MPa e apontam que a resistência mecânica decresce com a temperatura. Ainda, estes trabalhos indicam módulos de Weibull (m) entre 8 a 12 e resistência característica à flexão (σ_{LR-0}) em torno de 360 MPa para tais materiais [11]. Por outro lado, o trabalho de Auearki [10] aponta dois comportamentos que são dignos de nota: i) primeiramente, mesmo com perda de resistência mecânica, o autor evidenciou aumento da tenacidade à fratura (K_{IC}) como função da temperatura, o que indica um aumento da tolerância à existência de

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

trincas; ii) segundo, alguns resultados apresentaram aumento da resistência mecânica da alumina em torno de 800°C devido à ocorrência de uma fase vítrea. Tais comportamentos, embora não sejam foco do estudo, chamam ainda mais a atenção para a importância da devida caracterização de propriedades mecânicas de interesse de maneira precisa e como função da temperatura.



Figura 1. Trocador de calor cerâmico em alumina sendo desenvolvido no Centro Universitário da FEI (a) Parte traseira que se separou do restante do trocador devido a uma falha do cimento refratário de união das placas e (b) parte frontal fraturada também na transversal através das placas.

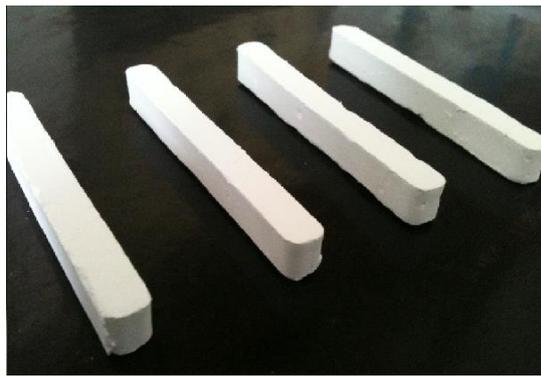
Deve-se acrescentar que as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos, devido à sua baixa tenacidade, são fortemente dependentes da microestrutura. Conseqüentemente, valores relatados na literatura podem diferir drasticamente daqueles obtidos em amostras de mesma composição, porém produzidas com matérias-primas e técnicas de conformação diferentes. No caso particular do referido trocador de calor, a técnica usada (gelcasting) requer a preparação de uma suspensão com alta concentração de sólidos e baixa viscosidade e, para atingir tais características, trabalha-se com uma distribuição de tamanho de partícula mais larga e projetada para conferir tais propriedades à suspensão. Isso resulta em uma microestrutura que difere da maioria daquelas encontradas em trabalhos voltados unicamente para a determinação de propriedades mecânicas em função da temperatura, onde geralmente utilizam-se materiais com um mínimo de porosidade e tamanho de grão pequeno. Neste cenário, este trabalho investiga as propriedades mecânicas da alumina α utilizada na construção de um trocador de calor cerâmico como função da temperatura na faixa de 23°C a 850°C.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

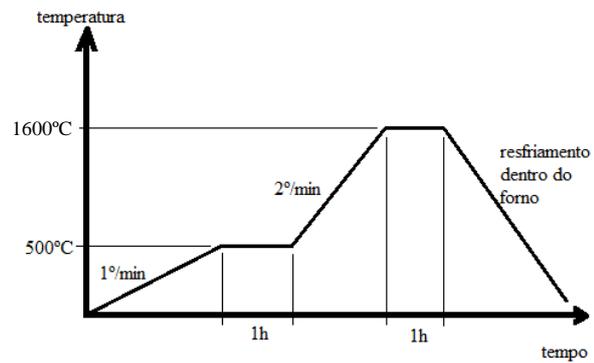
No total mais de 100 espécimes foram confeccionados utilizando a técnica de gelcasting [12] em um molde de alumínio de dez cavidades. Maiores detalhes do processo de conformação podem ser encontrados na referência [13]. As amostras desenvolvidas são do tipo B da norma ASTM C1161 [14], estão ilustradas na Figura 2(a) e possuem as seguintes dimensões: comprimento 75 mm, altura (h) 10 mm e espessura (b) 7,5 mm. Por fim, as amostras foram sinterizadas a 1600°C seguindo o procedimento apresentado pela Figura 2(b) e retificadas para garantia de dimensional, acabamento e qualidade dos ensaios.

Uma vez que as propriedades mecânicas são função da porosidade da alumina, foi vital caracterizá-la para as comparações com dados da literatura. Dessa forma, a determinação da porosidade foi realizada segundo a norma ASTM C373 [15].

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



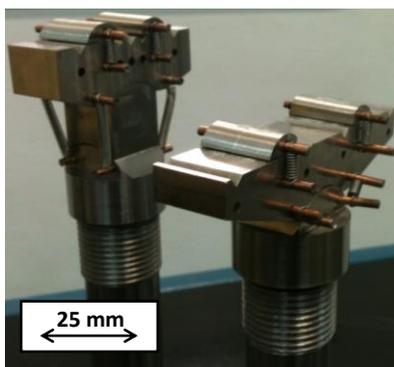
(a)



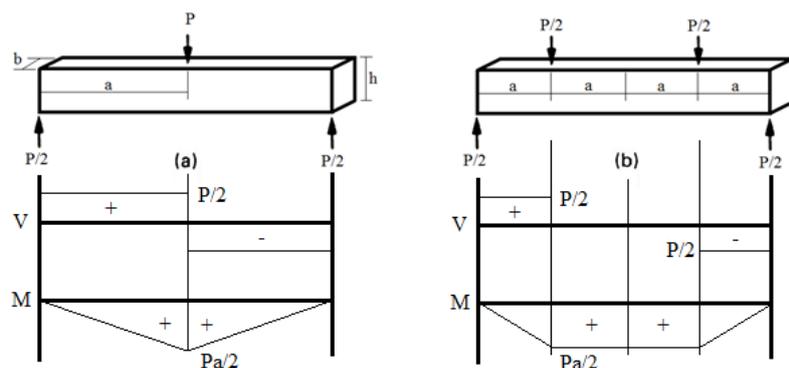
(b)

Figura 2. (a) Exemplos de corpos de provas confeccionados em alumina α (Al_2O_3) e (b) rampas de aquecimento e resfriamento empregadas para a sinterização das amostras.

Para garantia de precisão e repetibilidade dos ensaios, foi especialmente desenvolvido um dispositivo para ensaios de flexão em materiais cerâmicos (Figura 3a). O mesmo foi projetado seguindo algumas considerações da norma ASTM C1211 [16] no que se refere a eliminação de desalinhamentos e falta de paralelismo, mas com algumas inovações: i) foram incorporados graus de liberdade ortogonais adicionais (por meio de apoios contendo raios concordantes) para garantir o perfeito alinhamento dos apoios e compensação de inclinações; ii) a geometria foi desenvolvida para que seja facilmente adaptável para todas as modalidades de ensaio de flexão previstas na norma (diferentes tamanhos de amostras e em flexão de 3 ou 4 pontos – veja Figura 3b); iii) adicionalmente, o posicionamento dos componentes nos diversos graus de liberdade é controlado por molas de retorno adequadas a elevadas temperaturas; iv) por fim, o material empregado para sua confecção foi uma super liga de Níquel-Cromo (conhecida como Inconel 600) que é capaz de manter resistência e rigidez nas temperaturas de interesse.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Dispositivo para ensaios de flexão de materiais cerâmicos desenvolvido utilizando Inconel 600 e (b) modos de carregamento possíveis em flexão de 3 e 4 pontos. V e M representam, respectivamente, os diagramas de força cortante e momento fletor gerados em cada caso.

Os ensaios mecânicos de flexão em 3 e 4 pontos foram realizados segundo a norma ASTM C1211 [16], embora os de 3 pontos tenham sido realizados em menor quantidade e para fins exploratórios como será apresentado na sessão de resultados. Os ensaios de 4 pontos (preferíveis pela existência de uma região isenta de força cortante e com estabilidade de momento fletor no centro da amostra) foram

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

realizados em cinco temperaturas (23°C, 210°C, 425°C, 700°C e 850°C), sempre contando com 30 minutos dentro do forno para a estabilização da temperatura. Considerando resultados válidos nestas temperaturas, foram respectivamente 30, 24, 14, 14 e 8 corpos de prova ensaiados. Os ensaios foram realizados no Centro de Desenvolvimento de Materiais da FEI em máquina universal servocontrolada MTS 810 equipada com forno de resistências e célula de carga. A montagem é ilustrada na Figura 4(a) e algumas amostras fraturadas são apresentadas na Figura 4(b). Em todos os casos as fraturas ocorreram dentro da área útil entre apoios e na orientação transversal do espécime.

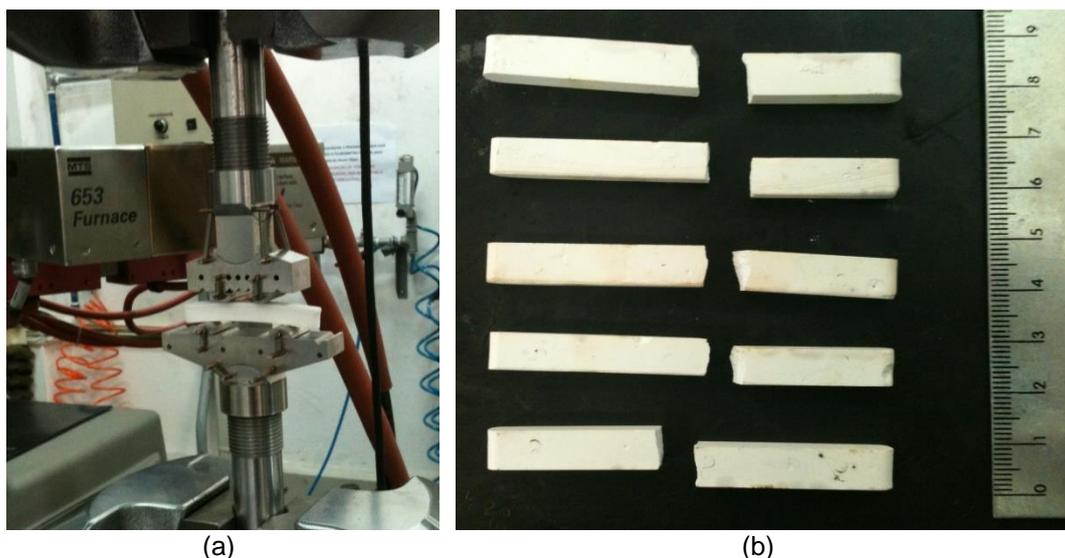


Figura 4. (a) Dispositivo de ensaio com amostra ilustrativa posicionada na máquina de ensaios MTS 810 do Centro Universitário da FEI e (b) exemplos de amostras fraturadas.

De posse das evoluções de carga dos ensaios até a fratura, os resultados de limite de resistência à flexão (σ_{LR}) foram descritos por distribuições bi-paramétricas de Weibull com intervalo de confiança de 95% [11]. Exceto quando explicitamente identificado no trabalho, todos os resultados dizem respeito a flexão de 4 pontos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em termos de propriedades básicas da alumina empregada nas amostras, a porosidade resultou em 28% (com desvio padrão de 0,33%), o que influenciou significativamente as propriedades mecânicas do material como será visto a seguir. Este elevado valor de porosidade pode possivelmente ser atribuído à distribuição de tamanho de partículas da formulação empregada, deficiente em partículas finas que favorecem a densificação. No entanto, ao mesmo tempo em que reduz a resistência mecânica e o módulo elástico, uma maior porosidade faz com que a energia elástica armazenada seja dissipada pela propagação de um grande número de microdefeitos, e não apenas do defeito crítico. Esta característica reduz o dano causado por gradientes térmicos muito abruptos, que é uma condição encontrada nos trocadores de calor que operam em temperaturas elevadas. Assim, a caracterização das propriedades é de grande interesse, pois os trocadores de calor desenvolvidos dentro do escopo do projeto são feitos pelo mesmo processo e a alumina obtida apresenta as mesmas características, as quais diferem fortemente das características de aluminas comumente descritas na literatura.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

3.1 Investigação exploratória sobre a aplicabilidade de modelos correlativos

Para testar o desempenho do dispositivo de ensaio desenvolvido e avaliar o efeito do modo de carregamento nas propriedades mecânicas, os primeiros resultados obtidos trataram de uma comparação, em temperatura ambiente, de ensaios realizados com flexão de 3 pontos e com flexão de 4 pontos. A Figura 5 apresenta a comparação entre resultados obtidos em cada caso, complementada pela Tabela 1. Como era esperado, a resistência mecânica avaliada em flexão de 4 pontos é menor devido ao maior volume de material sob tensão (vide diagramas de momento fletor na Figura 3b) e a aderência dos resultados experimentais à distribuição adotada foi bastante satisfatória mesmo com poucas amostras. Aplicando a teoria clássica de Weibull para incorporar os efeitos de volume carregado e distribuição de tensões nas propriedades mecânicas, resulta uma relação prevista entre a resistência característica à flexão em 3 pontos ($\sigma_{LR-3P-0}$) e a resistência característica à flexão em 4 pontos ($\sigma_{LR-4P-0}$), como apresentado pela Equação (1). Teoricamente, com base nas dimensões das amostras e modo de carregamento, a superestimativa de propriedades deveria ser de 30% ($\sigma_{LR-3P-0} / \sigma_{LR-4P-0} = 1,30$). Os resultados experimentais da Figura 5 e da Tabela 1 demonstram, por outro lado, $\sigma_{LR-3P-0} / \sigma_{LR-4P-0} = 1,20$. Este resultado, considerado juntamente à boa aderência dos dados à distribuição de Weibull e à natureza exploratória destes ensaios preliminares, pode ser considerado bastante promissor no que se refere ao uso do novo dispositivo desenvolvido e validação da tendência esperada.

$$\frac{\sigma_{LR-3P-0}}{\sigma_{LR-4P-0}} = \frac{\left\{ 0,5 \cdot \left[\frac{1}{(m_{4P} + 1)^2} + \frac{1}{(m_{4P} + 1)} \right] \right\}^{\frac{1}{m_{4P}}}}{\left\{ \frac{1}{(m_{3P} + 1)^2} \right\}^{\frac{1}{m_{3P}}}} \quad (1)$$

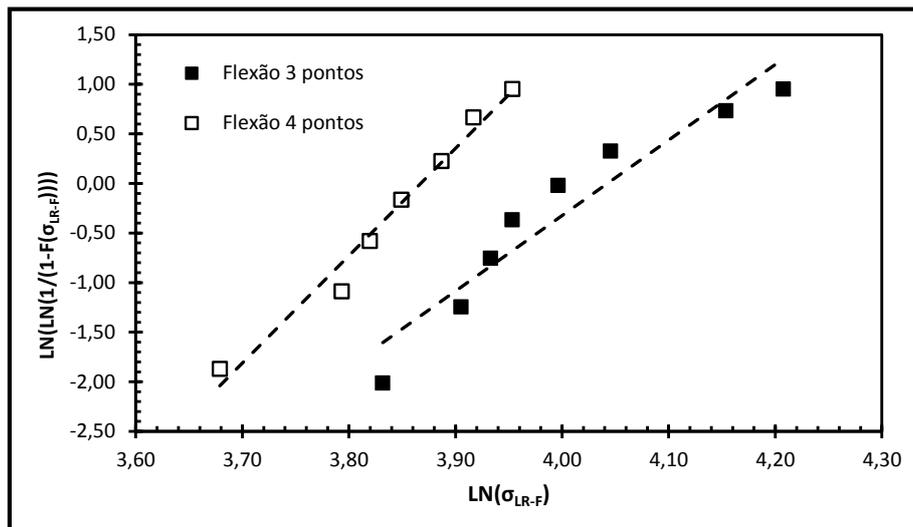


Figura 5. (a) Distribuições bi-paramétricas de Weibull para alumina ensaiada em flexão de 3 e 4 pontos.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 1. Resultados mecânicos preliminares da alumina (Al_2O_3) avaliados em temperatura ambiente para fins exploratórios. Os valores apresentados adotam distribuição bi-paramétrica de Weibull [11].

Propriedade	Flexão de 3 pontos	Flexão de 4 pontos
σ_{LR-0}	22,64 MPa	19,02 MPa
m	8,70	11,88

3.2 Resistência à Flexão em Função da Temperatura

Em todas as amostras ensaiadas, a evolução de carga (P) versus o deslocamento (Δ) foi essencialmente linear até a fratura final. De posse da carga de ruptura, a tensão máxima na flexão pôde ser calculada para cada amostra usando a teoria clássica de flexão de Bernoulli [15,16]. Estes resultados foram então ajustados utilizando distribuições bi-paramétricas de Weibull, nas quais a estimação dos parâmetros foi realizada utilizando máxima verossimilhança implementada em um algoritmo MatLab. A Figura 6 apresenta, para fins de ilustração, algumas destas distribuições considerando resultados de tensão limite de resistência à flexão em 4 pontos (σ_{LR}) e temperaturas de 23°C, 425°C e 850°C. Fica evidente a boa aderência dos resultados de falha ao modelo estatístico adotado, mesmo para 850°C (nesta temperatura, somente 8 testes puderam ser realizados e como consequência resultou a pior dispersão de resultados dentre as temperaturas avaliadas).

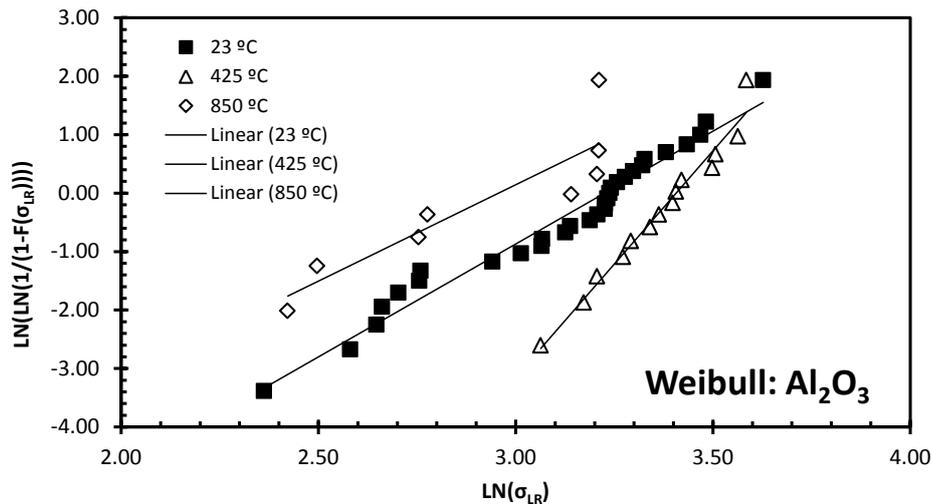


Figura 6. Distribuições de Weibull selecionadas para os resultados de tensão limite de resistência (σ_{LR}) obtidos para a alumina em estudo.

Considerando a resistência característica advinda das distribuições (σ_{LR-0} - 63º percentil de falha) e os respectivos módulos de Weibull, a Figura 7 e a Tabela 2 apresentam o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da alumina estudada no trabalho. Algumas constatações são de grande relevância na discussão dos resultados: primeiramente, os níveis de resistência mecânica obtidos são muito inferiores àqueles relatados na literatura (em torno de 8 a 10 vezes menores); adicionalmente, os módulos de Weibull obtidos entre aproximadamente 4 e 8 estão abaixo da faixa de 8 a 12 esperada. Ambas constatações são negativas do ponto de vista de integridade estrutural pois a resistência mecânica reduzida impacta em pequena capacidade de carga local dos componentes, ao mesmo tempo em que baixos módulos de Weibull indicam maior variabilidade das propriedades mecânicas do material. Certamente, estas ocorrências derivam da elevada porosidade e

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

presença de defeitos constatados na alumina desenvolvida para os trocadores de calor e espécimes sob investigação.

Especificamente falando sobre o efeito de temperatura nas propriedades de resistência à flexão, a Figura 7 evidencia que temperaturas a partir de $\sim 700^{\circ}\text{C}$ já acarretaram reduções bastante expressivas na resistência mecânica. Para fins de quantificação do efeito, entre 400° e 850°C , a queda na resistência característica à flexão de 4 pontos foi de 41%.

Considerando que o desempenho do material usado na construção de um trocador de calor cerâmico resulta de uma competição entre efeitos antagônicos, ou seja, resistência ao dano por choque térmico (que é favorecida pelo aumento da porosidade e não foi abordada neste estudo) e resistência mecânica (que diminui com o aumento da porosidade e do tamanho de grão), deve-se buscar uma condição de equilíbrio entre essas propriedades. Considerando ainda que o protótipo de trocador de calor que foi construído e testado apresentou falhas não apenas no sentido longitudinal (onde a resistência mecânica é controlada pela argamassa refratária usada para promover a união entre as placas), mas também no sentido transversal, fraturando as placas de alumina, fica evidente que este equilíbrio não foi atingido.

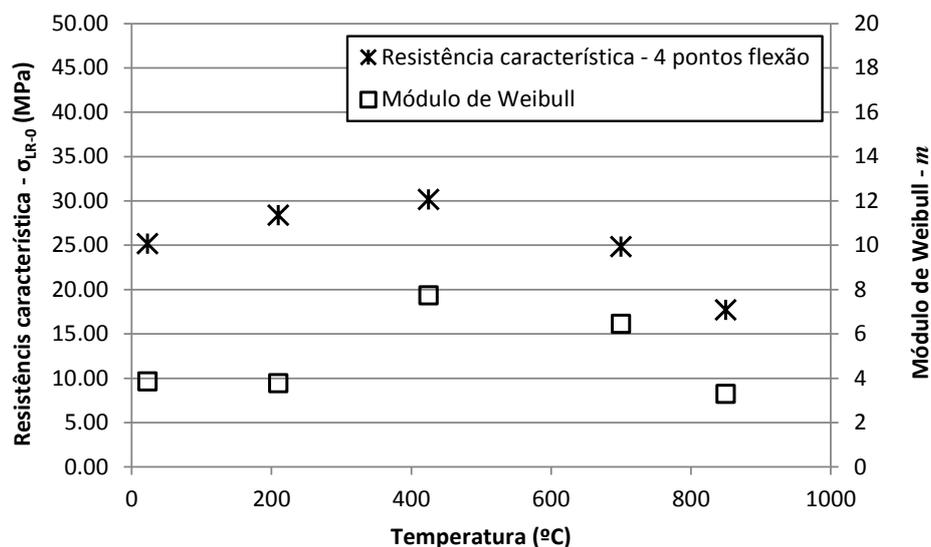


Figura 7. Valores característicos de resistência mecânica (σ_{LR-0} – 63º percentil) e do módulo de Weibull (m) como função da temperatura de ensaio.

Tabela 2. Resultados da alumina (Al_2O_3) avaliados como função da temperatura. Os valores apresentados adotam uma distribuição bi-paramétrica de Weibull [11].

Propriedade	23°C	210°C	425°C	700°C	850°C
σ_{LR-0} (MPa)	25,80	29,18	31,01	26,42	21,45
m	3,93	3,93	7,68	7,46	3,25

4 CONCLUSÃO

Do presente trabalho, algumas conclusões podem ser apontadas:

- O dispositivo desenvolvido resistiu a todas as temperaturas utilizadas mantendo as características de auto compensação geométrica e a sua integridade estrutural. Isto viabilizou os ensaios com rapidez e garantiu repetibilidade e boa aderência dos resultados de resistência a distribuições de Weibull.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

- Como era de se esperar, os ensaios em 3 pontos apresentaram uma resistência mecânica maior que os realizados em 4 pontos, o que comprova a dependência volumétrica das propriedades mecânicas auferidas para a alumina (Al_2O_3). Os ensaios em 4 pontos também demonstraram maior estabilidade e aderência à distribuição estatística adotada, o que motivou a sua utilização.
- Tratando-se da resistência mecânica da alumina em estudo, os resultados obtidos para σ_{LR-0} e m destoaram daqueles esperados de acordo com a literatura, potencialmente resultado da elevada porosidade de 28% e decorrente incidência de defeitos. Adicionalmente, uma queda expressiva na resistência (em torno de 41%) foi evidenciada entre 400° e 850°C, sendo esta constatação de grande relevância como resultado do trabalho uma vez que os trocadores de calor cerâmicos em desenvolvimento devem operar até esta temperatura com garantia de sua integridade estrutural.
- De posse da resistência característica e do módulo de Weibull para a solitação em flexão em 4 pontos utilizada, estes dados se tornam úteis a projeto mecânico com variados campos de tensões. Basta que modelos correlativos como o apresentado na seção 3.1 sejam aplicados para incorporar os efeitos de volume, campo de tensões e a probabilidade de sobrevivência desejada à aplicação.

Agradecimentos

Os autores agradecem: i) ao Centro Universitário da FEI pela infra-estrutura laboratorial para a preparação de amostras e realização dos ensaios mecânicos, ii) ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica PIBIC concedida a LBP, iii) à FAPESP pelo apoio dentro do projeto 2011/17657-7 e iv) ao mestre em engenharia Sérgio Scutto pela colaboração na confecção das amostras.

REFERÊNCIAS

- 1 Ashby MF, Jones DRH. Engineering materials 1 – An introduction to properties, applications and design, 4ª ed., Elsevier, 2012.
- 2 Ashby MF, Jones DRH. Engenharia de Materiais Volume 2, 3ª ed, Elsevier, 2012.
- 3 ASM International. ASM Handbook Volume 20: Materials Selection and Design, 1997.
- 4 Fishedick JS, Dreibigacker V, Tamme R. An innovative ceramic high temperature plate-fin heat exchanger for EFCC processes, Applied Thermal Engineering, 2007; 27.
- 5 Kautz, M.; Hansen, U. The externally-fired gas-turbine (EFGT-Cycle) for decentralized use of biomass, Applied Energy, 2007; 84.
- 6 Mello P, Scutto S, Ortega F, Donato G]. Influence of turbine inlet temperature on the efficiency of externally fired gas turbines. In: 11th International Conference on Sustainable Energy technologies (SET-2012), 2012: 996–1007.
- 7 Mello P, Donato GHB. Design of a Heat Exchanger for High Temperature Applications using Simulation Techniques. ENCIT 2010, Brasil.
- 8 Munro RG. Evaluated Material Properties for a Sintered α - Alumina. J. Am. Ceram. Soc., 80/8, 1919-28, 1997.
- 9 Sánchez-González E, Miranda P, Meléndez-Martínez JJ, Guiberteau F, Pajares A. Temperature dependence of mechanical properties of alumina up to the onset of creep, Journal of the European Ceramic Society, 2007; 27: 3345-3349.
- 10 Auerkari P. Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics. Nota técnica 1792 da VTT Manufacturing Technology, Finlândia, 1996.
- 11 Weibull W, Sweden SA Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, 1951.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

- 12 Young AC, Omatete OO, Janney MA, Menchhofer PA. Gelcasting of Alumina. J. Am. Ceram. Soc., 1991; 74: 612-618.
- 13 Maida PC, Mello PEB, Ortega FS, Scuotto, S. Desenvolvimento e fabricação de placas de alumina pelo processo gelcasting para construção de um trocador de calor cerâmico. 56º. Congresso Brasileiro de Cerâmica, Anais. Curitiba, 2012.
- 14 ASTM Standard C1161, Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature, West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- 15 ASTM Standard C373, Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, West Conshohocken: ASTM International, 2006.
- 16 ASTM Standard C1211, Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Elevated Temperatures, West Conshohocken: ASTM International, 2009.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.