

DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM MATERIAIS FRÁGEIS POROSOS VIA EMPREGO DE ENTALHES SEMICIRULARES¹

Polyana Borges Dias²
Eduardo Atem de Carvalho³

Resumo

O objetivo principal deste trabalho foi entender o comportamento em fratura de cerâmicas porosas usadas em escapamento de turbinas geradoras de eletricidade a gás por meio de ensaios mecânicos. O alto valor agregado dessas cerâmicas resultou em um objetivo secundário, a obtenção de um material frágil que apresente mesmo comportamento na fratura e que viabilize a realização dos ensaios. No presente trabalho foi estudado o comportamento em fratura de materiais frágeis, caulim e granito, a partir de ensaios mecânicos. Os corpos de prova destes materiais receberam concentradores de tensão nos formatos semicirculares e elípticos.

Palavras-chave: Materiais frágeis; Mecânica da fratura; Cerâmicas porosas.

DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS IN POROUS BRITTLE MATERIALS BY USE OF SEMICIRCULAR NOTCHES

Abstract

The objective of this study was to understand the fracture behavior of porous ceramics used in exhaust turbine electricity generating gas by means of mechanical tests. The high value of these ceramics resulted in a secondary objective, the achievement of a brittle material to produce the same behavior in the fracture and that makes possible the testing. In this paper the fracture behavior of brittle materials, kaolin and granite, from mechanical tests. The samples of these materials received stress concentrators in the semi-circular and elliptical shapes.

Key words: Brittle materials; Fracture mechanics; Porous ceramics.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng^o Metalúrgico e de Materiais, Professora do Curso Técnico em Mecânica, IFF (Instituto Federal Fluminense), Campos dos Goytacazes, RJ. polyana_borges@yahoo.com.

³ Eng^o Mecânico, Ph.D. Professor Associado do Laboratório de Materiais Avançados, UENF, Campos dos Goytacazes, RJ.

1 INTRODUÇÃO

Em se tratando de filtros para escapamentos de turbinas queimadoras de gás para a produção de eletricidade, existe grande demanda por estudos que melhorem a vida útil dos mesmos. Atualmente são utilizados filtros fabricados em cerâmicas, que devido à alta porosidade, apresentam comportamento mecânico não linear e baixa tenacidade à fratura, o que interfere nas suas propriedades mecânicas e na sua vida útil.

O objetivo principal deste trabalho foi entender o comportamento em fratura das cerâmicas porosas por meio de ensaios mecânicos. O alto valor agregado dessas cerâmicas resultou em um objetivo secundário, a obtenção de um material frágil que apresente mesmo comportamento em fratura e que viabilize a realização dos ensaios mecânicos.

No esforço de entender melhor o comportamento na fratura destas cerâmicas altamente porosas foram realizados estudos preliminares, no intuito de se determinar o comportamento na fratura e ainda, possibilitar a utilização de um material substituto de menor valor agregado que possa servir como amostra inicial em análises por meio de ensaios mecânicos.

Neste trabalho, foram utilizados ensaios de compressão diametral seguindo análise de literatura e como nova forma de avaliação, ensaios de flexão, em três e quatro pontos.

Vale ressaltar que após vários ensaios, não foi obtido um resultado conclusivo em relação ao comportamento em fratura destes materiais. O assunto requer ainda muitos estudos e experimentos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caulim

O Caulim ocorre sob a forma de alteração de feldspatos, feldspatóides e outros silicatos, durante o intemperismo químico e também pelo hidrotermal em rochas cristalinas (caulim primário). Pode formar-se também por processos diagenéticos em bacias sedimentares. Portanto pode ser formado a expensas de muitos minerais e rochas e em quantidades consideráveis (caulim secundário). É um material formado por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita, podendo ocorrer também em sua estrutura os minerais do grupo da caulinita (diquita, nacrita, folerita, anauxita, colirita e tuesita). Além destes, o caulim sempre contém substâncias sob a forma de impurezas, consistindo, de modo geral, de areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxidos de ferro e titânio, e outros, que ocorrem desde pequenas quantidades até próximo a 40% em volume.

O caulim usado foi o da Monte Pascoal e foi obtido por intermédio do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV-UENF).

Caulins são argilo-minerais, isto é, rochas constituídas de material argiloso, com baixo teor de ferro, de cor branca e cuja composição química genérica é de um silicato de alumínio hidratado. Para este trabalho foi utilizado este material devido à necessidade de se utilizar um material frágil, que pudesse representar uma possibilidade economicamente viável de realizar os experimentos.

As misturas foram preparadas manualmente, sendo cada mistura individual para a preparação de um CPC realizada por vez. A operação de mistura teve como parâmetro tempos de 2 minutos.

Como parâmetro para medir a homogeneização das misturas, estas passavam por uma peneira de 20 *mesh*. Se a mistura fosse peneirada e não agarrasse esta era passada para a etapa seguinte, caso contrário, era novamente misturada e peneirada, seguindo os parâmetros iniciais de tempo e procedimento. As misturas só passavam para a etapa seguinte quando estivessem bem homogêneas.

Para a prensagem das amostras foi utilizada então uma prensa semi-automática (Dan-Press, modelo DC-20-Red-Lines), onde os CPC ficaram sob a pressão máxima (4 toneladas) por 30 segundos e o descarregamento foi efetuado o mais lento possível, para minimizar o efeito das tensões residuais.

A queima dos CPC inicialmente foi realizada à temperatura de 950°C por três horas, com taxa de aquecimento de 2°C/min. e resfriamento no próprio forno para minimizar contrações bruscas e o conseqüente aparecimento de trincas. Os CPC obtidos com este tratamento térmico não ficaram com as propriedades esperadas, que neste trabalho são suas características de material frágil.

2.2 Granito

O granito por sua vez ocorre como resultado da solidificação do magma em grandes profundidades, como uma rocha ígnea intrusiva.

Possui estrutura granular, onde os minerais constituintes são bem visíveis e identificáveis, devido ao retardamento de sua solidificação, causado pela dificuldade de trocar calor com o ambiente em função das rochas que o envolvem. Esta impossibilidade de trocar calor dá aos minerais o tempo necessário para difundir na estrutura ainda liquefeita da rocha que após a solidificação é chamada granito.

Os principais minerais que constituem o granito são: quartzo, feldspatos (em forma de ortoclase, sanidina e microlina) e micas (em forma de biotita e moscovita).

No presente trabalho o granito utilizado é do tipo cinza andorinha, bastante comum na região norte fluminense do estado do Rio de Janeiro.

O granito utilizado é do tipo cinza andorinha e foi obtido em setembro de 2009 e é proveniente da região sudeste, mais especificamente do estado do Rio de Janeiro.⁽¹⁾

Para a utilização no presente trabalho, as placas foram cortadas em pequenas barras por um esmeril estas barras possuem tamanho aproximado e são limpas antes de sofrerem qualquer tipo de medição ou de serem ensaiadas.

2.3 Ensaio de Compressão Diametral

Estes ensaios foram realizados nos corpos de prova de caulim em formato de disco, sob condições controladas de temperatura, umidade e parâmetros do ensaio, para possibilitar repetibilidade. A taxa de avanço do travessão da Instron foi de 0,1 mm/min. O esquema deste ensaio pode ser observado na Figura 1.

O objetivo principal deste ensaio foi obter a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade para materiais frágeis através da utilização do disco brasileiro.⁽²⁾

A tensão nominal (σ_x) foi obtida através de consulta à literatura e utilização das fórmulas empregadas no modelo clássico da elasticidade. As Equações 1 e 2, que são usadas para o ensaio de compressão para discos sólidos e para discos com concentradores de tensões respectivamente.^(2,3)

$$\sigma_x = \frac{2.P}{\pi.D.t} \quad (1)$$

$$\sigma_x = \left[\frac{3.P.(Re+ Ri)}{\pi.t.(Re- Ri)^2} \right] \quad (2)$$

Onde P é a carga máxima na compressão, D é o diâmetro do disco, Re é o raio externo, Ri o raio interno e t é a espessura.

2.4 Teste de Flexão em Três Pontos

Neste ensaio o momento fletor cresce uniformemente dos suportes de apoio até o centro da barra, onde a carga é aplicada. Neste ponto o momento fletor é máximo e gera a maior tensão.

O ensaio de flexão em três pontos foi utilizado nos corpos de prova de caulim em formato de barra para realizar a comparação entre os valores das propriedades obtidos no ensaio de compressão.

Os ensaios de Flexão em três pontos foram realizados apenas nos CPC, sob condições controladas, com taxa de avanço de 0,1 mm/min.

Como já descrito, os corpos de prova de caulim em formato de barra foram usados para ensaios de flexão em três pontos, onde a tensão nominal é dada pela Equação 3.⁽⁴⁾

$$\sigma_x = \frac{3}{2} \cdot \frac{(P.L)}{(t.H^2)} \quad (3)$$

Na equação acima, P é a carga aplicada; L o comprimento; t a espessura; e H é a largura do corpo de prova de caulim.⁽⁴⁾

2.5 Ensaio de Flexão em Quatro Pontos

Os testes de flexão em quatro pontos foram utilizados apenas nos corpos de prova de granito e realizados na Instron 5582 com taxa de avanço do travessão de 1 mm/min. e com taxa de aquisição de dados a cada segundo.

Para bases de cálculo é importante saber a distância entre os pontos de apoio. Os pontos de apoio superiores da máquina, de carregamento, estavam dispostos a uma distância de 74 mm (S1) e os pontos de apoio inferiores, fixos, a 140 mm (S2) um do outro (Figura 2a).

Este tipo de carregamento gera um momento fletor crescente dos suportes de apoio até a região de carregamento mais próximo e um momento fletor constante entre estas regiões de aplicação da carga.

Para os cálculos da tensão nominal usada neste ensaio foi utilizada a Equação 4.^(4,5) Cabe ressaltar que esta equação é usada apenas para os corpos de prova de granito sem entalhe, pois, nos demais, deve ser levado em conta à concentração de tensões causada pelo entalhe.

$$\sigma_{4P} = \frac{3P.(S_2 - S_1)}{t.H^2} \quad (4)$$

Na equação acima os valores de S₁ e S₂ são constantes, e são, respectivamente, a distância entre os pontos de carregamento e apoio utilizados no ensaio de flexão, os demais símbolos são as mesmas descritas acima

Para os corpos de prova de granito com entalhe a tensão nominal deve ser calculada pela Equação 5.⁽⁶⁾

$$\sigma_x = \frac{6.M}{t.H^2} \quad (5)$$

Onde M é o momento fletor, e H é a largura na seção onde foi preparado o entalhe. A partir do resultado da tensão nominal, foi obtido o E pela equação da flecha para flexão em quatro pontos, aqui descrita como Equação 6.⁽⁴⁾

$$E = \frac{P.b.(3.S_2^2 - 4.b^2)}{4.t.H^3.\delta} \quad (6)$$

Onde, além dos termos já conhecidos, temos b, que é a distância entre um dos pontos de suporte e o ponto de carregamento mais próximo, e δ é a flecha. Os demais símbolos estão de acordo com o descrito anteriormente.

3 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

3.1 Corpos de Prova de Caulim

Os corpos de prova de caulim foram divididos pela geometria do entalhe (Tabela 1).

Tabela 1. Características estruturais dos CPC

| Amostra | Espessura (mm) | Diâmetro do Furo (mm) | Raio da Cavidade - Ri (mm) | Raio do Disco - Re (mm) |
|---------|----------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|
| TD-1 | 7,58 | Sem furo | Sem furo | 26,05 |
| TD-2 | 6,70 | 1,00 | 0,50 | 26,03 |
| TD-3 | 7,41 | 3,16 | 1,58 | 26,07 |
| TD-4 | 7,02 | 6,72 | 3,36 | 27,92 |

Tabela 2. Relação Ri/Re e Kt

| Amostra | Ri/Re | Kt |
|---------|-------|------|
| TD-2 | 0,02 | 1,83 |
| TD-3 | 0,06 | 1,65 |
| TD-4 | 0,12 | 1,43 |

A partir dos dados da tabela acima pode ser determinado o valor de Kt (Fator de concentração de tensões) para os corpos de prova de caulim com furo no centro pela relação Ri/Re (Tabela 2).⁽⁶⁾

A partir da análise da Tabela 2 pode ser observado que o Kt decai quando se aumenta Ri, ou seja, furos maiores concentram menos tensão.

Tabela 3. Tensão nominal e tensão de ruptura

| Amostra | Kt | Carga Máxima (N) | Tensão Nominal - σ_x (MPa) |
|---------|------|------------------|-----------------------------------|
| TD-1 | 1,00 | 3.575,06 | 131,05 |
| TD-2 | 1,83 | 1.668,85 | 64,87 |
| TD-3 | 1,65 | 2.067,55 | 91,07 |
| TD-4 | 1,43 | 726,42 | 35,97 |

Pela análise da Tabela 3 podemos observar que de TD-4 para TD-1 houve um incremento em σ_x , porém em TD-3, este acréscimo superou o de TD-2, que possui um furo menor. Este resultado não condiz com o esperado e, no presente trabalho,

não pôde ser melhor analisado devido ao baixo número de corpos de prova estudados.

A curva tensão–deformação característica obtida para estas amostras pode ser visualizada na Figura 1.

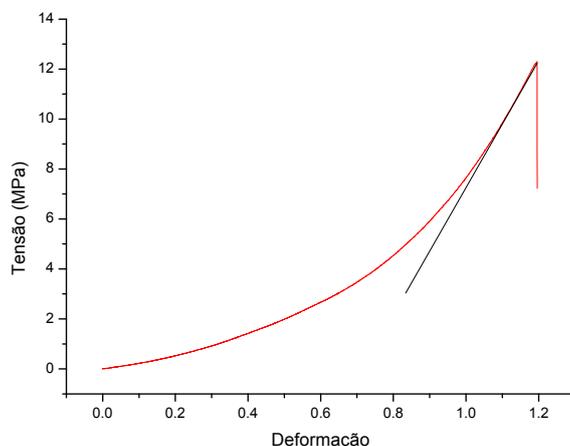


Figura 1. Curva tensão - deformação características dos corpos de prova de caulim.

3.2 Corpos de Prova de Granito

A tensão nominal é a medida indicativa do concentrador de tensões. Quanto menor a tensão necessária para chegar à ruptura de um corpo de prova com entalhes, maior o Fator Concentrador de Tensões. A Tabela 4 apresenta os valores médios da tensão nominal e seus desvios padrões.

Tabela 4. Tensão nominal média dos corpos de prova de granito

| Amostras | Tensão Nominal - σ_x (MPa) | Desvio Padrão |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|
| Sem Entalhe | 27,38 | 3,65 |
| Entalhe Elíptico | 26,22 | 1,64 |
| Entalhe Semi-Circular | 22,58 | 4,62 |

Pela Tabela 4 pode ser observado o comportamento, onde a Tensão Nominal cai com o aumento do K_t e com a atenuação do concentrador de tensões, como esperado.

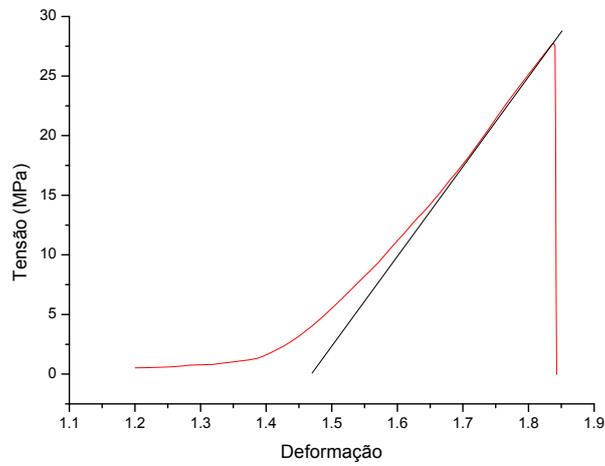
O E de um material não muda, mesmo com variação na sua geometria ou dimensão. Os valores de E podem ser comparados na Tabela 5.

Tabela 5. Módulo de Elasticidade médio dos corpos de prova de granito

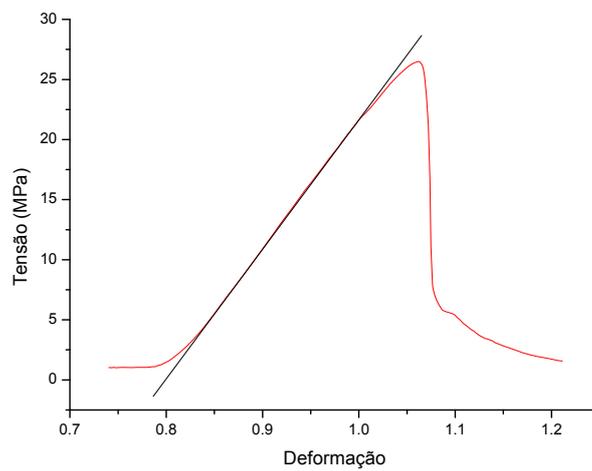
| Amostras | E (GPa) | Desvio Padrão |
|-----------------------|----------------|----------------------|
| Sem Entalhe | 68,46 | 3,34 |
| Entalhe Elíptico | 71,38 | 2,53 |
| Entalhe Semi-Circular | 69,99 | 3,41 |

Esses valores foram comparados com os dados obtidos na literatura, que apresenta para o granito uma variação entre 60 GPa a 80 GPa de acordo com Ashby e Jones.⁽⁷⁾ Assim, pode ser observado que as médias obtidas para esta propriedade estão dentro da especificação.

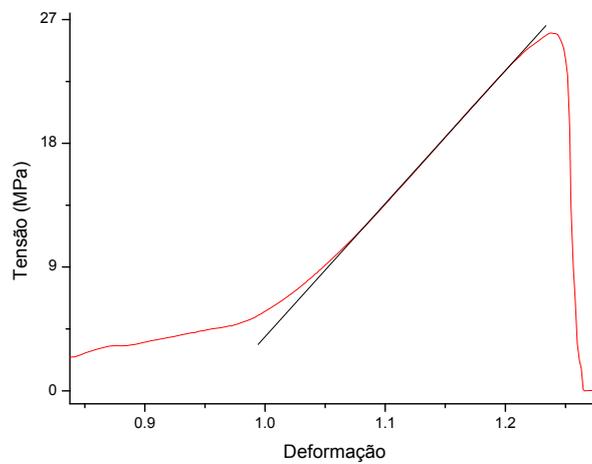
As curvas tensão - deformação para os corpos de prova de granito são dependentes da geometria do concentrador de tensão usado e são vistas na Figura 2.



(a) Sem entalhe.



(b) Entalhe semicircular.



(c) Entalhe elíptico

Figura 2. Curvas tensão - deformação característica para os corpos de prova de granito.

4 CONCLUSÕES

Para os fins desejados (simular uma cerâmica altamente porosa) os melhores resultados foram obtidos pelo granito.

O número de corpos de prova fabricados e testados neste estudo foi insignificante do ponto de vista estatístico, uma vez que algumas grandezas estudadas são conhecidas pela sua grande dispersão de resultados encontrados em um mesmo lote de teste. Os valores obtidos servem, porém, como possíveis indicadores de comportamento.

Foi observado, entretanto, um efeito ainda não totalmente entendido, onde o aumento da severidade do concentrador de tensões implica no aumento do patamar não linear da fratura.

Este efeito não pode ser atribuído à natureza semi-frágil do material, uma vez que existe uma clara interação entre a severidade da descontinuidade e extensão do patamar.

REFERÊNCIAS

- 1 Catálogo de Rochas Ornamentais do Rio de Janeiro, 2000.
- 2 Wang, Q. Z., Xing, L. (1999). "Determination of fracture toughness K_{IC} by using the flattened Brazilian disk specimen for rocks". *Engineering Fracture Mechanics* 64, p. 193-201.
- 3 Wang, Q.Z., et. al. (2004). "The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41, p. 245–253
- 4 Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A. (2000). *Ensaio dos Materiais - 1ª Ed.* Rio de Janeiro. LTC, p. 46-64, 102-117.
- 5 Tanaka K., et. al. (2003). "R-curve behavior in fracture of notched porous ceramics". *Engineering Fracture Mechanics* 70, p. 1101-1113.
- 6 Pilkey, W. D. (1997). *Stress Concentration Factors*. 2ª Ed. New York. Wiley Interscience, p. 107, 110, 437
- 7 Ashby, M.F. and Jones, D.R.H. *Engineering Materials 2*. Oxford, Reino Unido, Pergamon Press, 1994.