

# Tenacidade à fratura de cerâmicas de carbeto de silício, alumina e argila vermelha pelos métodos IF e SEVNB

## *(Fracture toughness of silicon carbide, alumina and red clay based ceramics by IF and SEVNB methods)*

S. Ribeiro<sup>1</sup>, G. C. Ribeiro<sup>1</sup>, J. A. Rodrigues<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Materiais - DEMAR, Escola de Engenharia de Lorena - EEL, Universidade de S. Paulo - USP, Estrada Santa Lucrecia s/n, Bairro Mondezir, C.P. 116, Lorena, SP 12600-970

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de S. Carlos, Rod. Washington Luiz, km 235, C. P. 676, S. Carlos, SP 13565-905

### Resumo

A tenacidade à fratura,  $K_{IC}$ , é uma importante propriedade dos materiais cerâmicos, pois ela mede a resistência ao início da propagação de trinca. O problema é selecionar o método adequado para determinar  $K_{IC}$ , já que existem vários, cada um com suas particularidades. Por comodidade, escolhe-se o método da indentação, IF, que apresenta certos inconvenientes, principalmente para cerâmicas porosas. Sendo o método mais adequado, o SEVNB. Nesse trabalho são mostrados resultados de  $K_{IC}$  para três materiais: carbeto de silício (SiC), alumina ( $Al_2O_3$ ) e uma base de argila, uma telha cerâmica. Os resultados mostraram que os valores de  $K_{IC}$  são maiores quando é utilizado o método IF, sendo que quanto mais porosa é a cerâmica mais difícil é a aplicação desse método, e que o método SEVNB, pode ser aplicado com êxito. Os resultados de  $K_{IC}$ , medidos pelo método SEVNB são 3,8 MPa.m<sup>1/2</sup>, 2,5 MPa.m<sup>1/2</sup> e 0,4 MPa.m<sup>1/2</sup> para SiC,  $Al_2O_3$  e telha, respectivamente.

**Palavras-chave:** cerâmicas, entalhe, tenacidade à fratura, IF, SEVNB.

### Abstract

Fracture toughness,  $K_{IC}$ , which measures the resistance to crack propagation initiation of a pre-cracked body, is one of the most important properties of ceramic materials. The main problem is to select the most appropriate method to determine this property, since there are several ones, each of them with its own characteristics. Normally, for convenience, the indentation method is chosen. It is the IF (Indentation Fracture) method, which measures the crack size at the vertices of the indentation. However, that method has many drawbacks, especially if the ceramic material is porous, since it is very difficult to identify the extent of the propagated crack. The most suitable method for measuring fracture toughness is the SEVNB (Single Edge V Notch Beam). This paper describes  $K_{IC}$  results for three different materials: silicon carbide, SiC, alumina,  $Al_2O_3$ , and a clay based ceramics, ceramic tile, with distinct porosities. The results indicate that the values of  $K_{IC}$  are higher when the IF method is used, and the more porous the ceramics is, the more difficult it is to apply this method. On the other hand, the SEVNB method, regardless porosity, can be applied successfully. The  $K_{IC}$  values measured by the SEVNB method were 3.8 MPa.m<sup>1/2</sup>, 2.5 MPa.m<sup>1/2</sup> and 0.4 MPa.m<sup>1/2</sup> for SiC,  $Al_2O_3$  and ceramic tile, respectively.

**Keywords:** ceramics, notch, fracture toughness, IF, SEVNB.

## INTRODUÇÃO

A tenacidade à fratura,  $K_{IC}$ , é uma das mais importantes propriedades dos materiais cerâmicos. Ela mede a capacidade de um material resistir à propagação de uma trinca em uma peça pré-trincada [1, 2]. Entretanto, a medida dessa propriedade é ainda motivo de discussões e controvérsias, existindo vários métodos, uns padronizados e outros não, além de diversas equações para seu cálculo. Os principais métodos para a determinação da tenacidade à fratura, com suas respectivas peculiaridades são encontrados facilmente na literatura [1, 3-13].

Apesar das controvérsias, o método da indentação e posterior medida da trinca, IF (Indentation Fracture), é muito

utilizado para cerâmicas densas, não porosas, porém para cerâmicas porosas esse método é completamente inútil, pois não tem como verificar e medir a trinca propagada devido à sua intersecção com os poros. Além disso, utiliza outras propriedades na composição dos cálculos que, se não forem muito bem determinadas, aumentam o erro no valor final, um exemplo é o módulo de elasticidade [3, 4, 6, 13].

O método da quebra por flexão de barras entalhadas em "V", SEVNB (do inglês Single Edge V-Notched Beam) parece ser um método mais viável para cerâmicas densas e porosas apesar de ainda não ser tão divulgado, principalmente no Brasil [2, 4, 5, 8, 10-13]. Para as cerâmicas avançadas existe uma norma que estabelece todas as diretrizes para esse método [11]. Segundo a literatura, o método SEVNB tem sido

aplicado para cerâmicas técnicas e algumas dentárias, sendo encontrado somente uma publicação em que foi utilizado para a caracterização de telhas cerâmicas [8]. O método SEVNB consiste em pré-entalhar uma amostra cerâmica com um disco diamantado fino (espessura em torno de 0,5 mm) e posterior afinamento desse entalhe com uma lâmina de barbear que conduz a pasta de diamante e promove o afinamento da ponta do entalhe [1, 2, 4, 5, 7, 12]. Em alguns trabalhos os autores fizeram o entalhamento direto com lâmina de barbear e pastas com diferentes granulometrias, sem utilização do pré entalhe com disco diamantado de pequena espessura [8, 11, 13].

Existem muitos trabalhos mostrando a importância do raio de curvatura do entalhe, inclusive fazendo referência à influência deste em relação ao tamanho de grão do material a ser analisado. Isso, no caso de cerâmicas policristalinas com grãos bem definidos, não é difícil de especificar, mas para cerâmicas sinterizadas via fluxo viscoso, essa questão não é tão simples. As cerâmicas a base de argila são exemplos desses últimos materiais [8, 14].

Nesse trabalho, estudou-se o comportamento da medida da tenacidade à fratura de três materiais propositadamente diferentes em termos microestruturais e verificou-se a aplicabilidade dos métodos IF e SEVNB para esses materiais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para as amostras de SiC foram usados os seguintes materiais: carbetto de silício - SiC, tipo GRADE BF-12 da Hermann C. Starck (HCS); óxido de alumínio -  $Al_2O_3$  BaikaloX, 99,99% de pureza; óxido de ítrbio -  $Yb_2O_3$  ABCR GmbH&Co, 99,9% de pureza; óxido de disprósio  $Dy_2O_3$  ABCR GmbH&Co., 99,9% de pureza; álcool isopropílico -  $CH_3CHOHCH_3$  Synth P.A. ACS. Foram feitas duas misturas: uma com SiC + 10% ( $Yb_2O_3$  +  $Al_2O_3$ ) e outra com SiC + 10% ( $Dy_2O_3$  +  $Al_2O_3$ ), sendo que em ambas, o SiC representa 90% do volume da mistura e os aditivos 10%. As composições dos aditivos referem-se às respectivas composições eutéticas. A Tabela I mostra as quantidades usadas desses materiais.

Os pós, Tabela I, foram pesados e misturados em moinho de atrito por 6 h a 1000 rpm, em meio de álcool isopropílico. Após mistura, a suspensão foi seca em evaporador rotativo, a 90 °C e os pós já preparados foram desaglomerados em peneira

Tabela I - Composição das misturas de SiC e aditivos (em massa).

[Table I - Composition of the SiC and additives mixtures (weight).]

Misturas de pós	Código	Componentes (g)			
		SiC	$Al_2O_3$	$Yb_2O_3$	$Dy_2O_3$
SiC + 10% ( $Yb_2O_3$ + $Al_2O_3$ )	SiCYb	120	12,76	9,39	0,0
SiC + 10% ( $Dy_2O_3$ + $Al_2O_3$ )	SiCDy	120	12,10	0,0	8,45

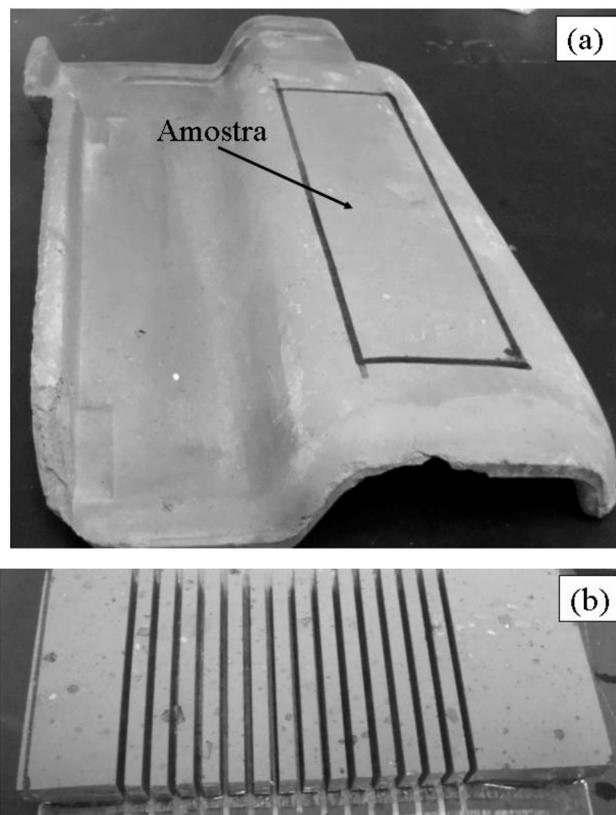


Figura 1: (a) Telha romana usada para retirada da amostra primária, (b) amostras finais para análise de absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), densidade aparente (DA) e tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ).

[Figure 1: (a) Roman roofing tile used to cut the preliminary specimens, (b) final specimens to measure the water absorption, apparent porosity, parent density and fracture toughness.]

ABNT 40. As amostras foram prensadas uniaxialmente sob 100 MPa, resultando nas dimensões de 63 mm x 8 mm x 6 mm, que foram sinterizadas a 1950 °C, por 1 h, em atmosfera de argônio, em um forno Astro da Thermal Technology Inc.

Para a obtenção das amostras de  $Al_2O_3$  foram usados: óxido de alumínio -  $Al_2O_3$  BaikaloX, 99,99% de pureza; nitrato de magnésio -  $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  - CAAL, PA-ACS; e dispersante - Disperlam LA - Lambert Brasil. Foi tomado como base 1 kg de alumina e quantidade suficiente de nitrato de magnésio para conter 400 ppm de MgO na cerâmica final. As duas substâncias foram misturadas em meio aquoso juntamente com o dispersante por 12 h. A suspensão final foi seca em evaporador rotativo, sendo o pó final passado em peneira de malha 20. Foram prensadas amostras nas dimensões de 63 mm x 8 mm x 6 mm, sinterizadas ao ar, em forno elétrico de resistência de dissiliceto de molibdênio, Maitec FL 1.700/20, com taxa de aquecimento de 5 °C/min, com patamar em 1450 °C por 2 h. Após sinterização, as amostras de SiC e de  $Al_2O_3$  foram retificadas nos quatro lados com rebolo diamantado com grana ABNT 120, utilizando uma retificadora modelo TA42 da Ferdimat, ficando as mesmas com as dimensões 63 mm x 5 mm x 3 mm.

Para as amostras de cerâmica a base de argila foi usada uma telha cerâmica, tipo romana da região de Barra Bonita,

SP. Dessa telha foi cortada uma fatia na posição indicada na Fig. 1a. A partir dessa fatia foram cortadas amostras nas dimensões 63 mm x 8 mm x 6 mm, Fig. 1b, que foram retificadas nas quatro faces cujas novas medidas foram 63 x 5 mm x 3 mm. A partir das amostras de SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e telha retificadas, conforme descrito anteriormente, as mesmas foram coladas em placas de aço, em número de 7, como prevê a norma ISO 23146-08 [11]. O conjunto placa/amostras foi levado a nova retificação para deixar as amostras nas dimensões de 63 mm x 4 mm x 3 mm.

O entalhamento foi realizado na máquina mostrada na Fig. 2, cujos detalhes de construção e operação foram mostrados [13]. Foi usada lâmina de barbear de espessura 0,06 mm (lâmina convencional) e pastas de diamante com granulometrias de 6 µm, para o entalhe inicial, e de 1 µm, para o afinamento da ponta do entalhe. A velocidade de deslocamento da mesa foi de 130 deslocamentos/min e a carga de 3 N.

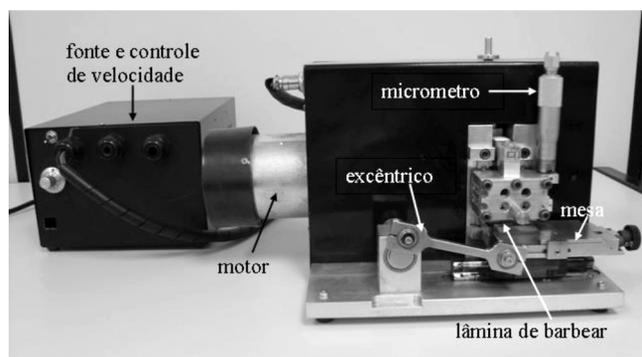


Figura 2: Fotografia da máquina de entalhamento das amostras para a medida de  $K_{IC}$  pelo método SEVNB.

[Figure 2: Picture of the machine used to notch the specimens to measure the  $K_{IC}$  applying the SEVNB method.]

Após o entalhamento, as amostras foram descoladas da placa de aço, limpas com acetona, secas em estufa e submetidas à flexão em 4 pontos em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS 810M, com velocidade de deslocamento do atuador 0,5 mm/min. Nas amostras fraturadas foram realizadas as medidas da região do entalhe para obtenção do seu tamanho médio, “a”, que é utilizado no cálculo de  $K_{IC,SEVNB}$ . Para efetuar essas medidas, foi utilizada uma lente com régua calibrada, com precisão de 0,025 mm, acoplada a uma lupa estereoscópica Quimis Q740SZ. Para o cálculo de  $K_{IC,SEVNB}$ , foram utilizadas as seguintes equações [4, 7, 8, 11, 13]:

$$K_{IC,SEVNB} = \frac{F}{B\sqrt{W}} \frac{(S_1 - S_2)}{W} \frac{3\sqrt{\alpha}}{2(1-\alpha)^{1.5}} \quad (A)$$

$$\alpha = \frac{a_{\text{medio}}}{W} \quad (B)$$

$$Y^* = 1,9887 - 1,326\alpha - \frac{(3,49 - 0,68\alpha + 1,35\alpha^2)\alpha(1-\alpha)}{(1-\alpha)^2} \quad (C)$$

em que  $K_{IC,SEVNB}$  é a tenacidade à fratura obtida pelo método SEVNB ( $MPa.m^{1/2}$ ),  $F$  é a carga de fratura (MN),  $B$  é a largura da amostra ( $m$ ),  $W$  é a altura da amostra, ( $m$ ),  $S_1$  e  $S_2$  são as distâncias entre os roletes superiores e inferiores, respectivamente, do dispositivo de 4 pontos para flexão ( $m$ ),  $a_{\text{medio}}$  é a profundidade média do entalhe ( $m$ ),  $\alpha$  é a profundidade relativa do entalhe, adimensional, e  $Y^*$  é o fator de forma do fator de intensidade de tensão.

Para as medidas da tenacidade pelo método IF, as amostras foram lixadas e polidas com suspensão de diamante até 1 µm e indentadas em microdurômetro, para as amostras de SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e durômetro para as de telha cerâmica. A seguinte equação foi utilizada para os cálculos de  $K_{IC,IF}$  [4].

$$K_{IC,IF} = 0,018.H.a^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{0,4} \left(\frac{c}{a} - 1\right)^{-\frac{1}{2}} \text{ para } \left(\frac{c}{a}\right) \geq 3,5 \quad (D)$$

em que  $K_{IC,IF}$  é tenacidade à fratura do material ( $MPa.m^{1/2}$ ),  $E$  é o módulo de elasticidade do material (GPa),  $H$  é a dureza do material (GPa),  $a$  é a semi-diagonal da impressão Vickers ( $m$ ), e  $c = 1 + a$  ( $m$ ), em que  $l$  é o comprimento da trinca ( $m$ ).

As microestruturas foram avaliadas em microscópio eletrônico de varredura LEO 1450 VP. Para isso, as amostras foram lixadas e polidas com suspensões de diamante de até 1 µm. As amostras de SiC foram atacadas com tetraborato de sódio fundido (770 °C) para revelação da microestrutura e as de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e telha foram observadas sem nenhum tratamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 3 mostra a micrografia das amostras SiCDy e SiCYb, 3a e 3b, respectivamente. Nessas imagens pode-se observar que a fase secundária, proveniente dos aditivos, foram dissolvidas pelo tetraborato de sódio, e que somente os grãos de  $\alpha$ -SiC são observados. É uma microestrutura bem heterogênea sob o ponto de vista de distribuição de tamanho de grão, pois apresenta grãos variando de 2 µm a aproximadamente 20 µm. Essa microestrutura é típica de cerâmicas de SiC sinterizadas com misturas de aditivos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e terras raras [4, 13].

Na Fig. 4 observa-se a microestrutura das cerâmicas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e da telha. Em ambas vê-se uma elevada quantidade de poros, sendo que na telha esse volume ainda é maior.

Na Fig. 5 são mostradas as indentações Vickers nas cerâmicas estudadas. Nelas podem ser observadas as trincas que se iniciam nos vértices das indentações, e que para as cerâmicas de SiC são mais nítidas, mas mesmo assim são difíceis de serem medidas, enquanto que para o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> há uma maior dificuldade de se acompanhar a trinca. No caso da telha é praticamente impossível fazer uma avaliação precisa do tamanho das respectivas trincas. Quanto maior a porosidade, maior a dificuldade de se medir com precisão o tamanho da trinca, pois a mesma pode parar em um poro ou prosseguir sua propagação em outra direção.

A Fig. 6 mostra os entalhes em V das amostras de: (a) SiCYb, (b) SiCDy, (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e (d) amostra de telha. As

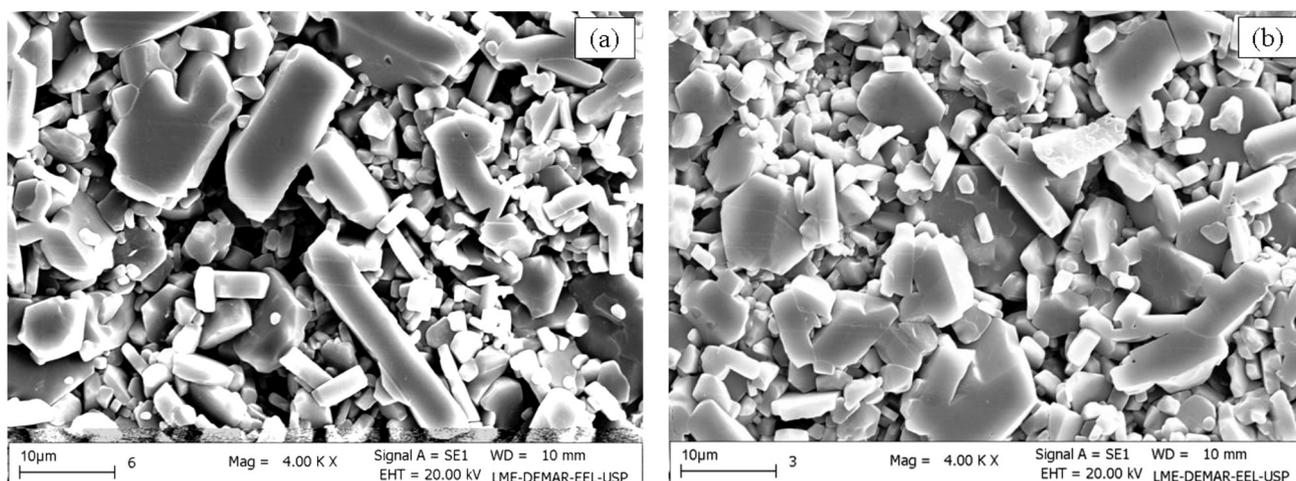


Figura 3: Micrografias obtidas em MEV, no modo elétrons secundários, do SiC sinterizado a 1950 °C por 1 h, polido e atacado com tetraborato de sódio fundido: (a) SiCDy e (b) SiCYb.

[Figure 3: SEM images, secondary electron mode, of the surface of SiC sintered at 1950 °C/1 h, polished and etching with sodium tetraborate: (a) SiCDy and (b) SiCYb.]

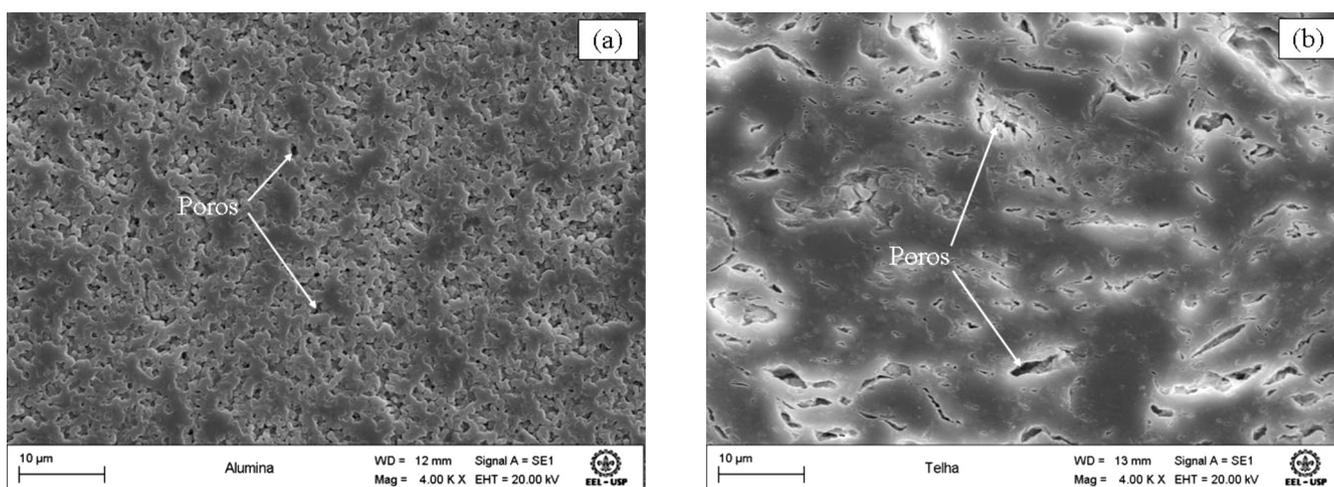


Figura 4: Micrografias obtidas em MEV de: (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sinterizada a 1450 °C, por 2 h e (b) telha cerâmica.

[Figure 4: SEM images, secondary electron mode, of the surface of: (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sintered at 1450 °C for 2 h and (b) roofing tile.]

imagens de MEV foram obtidas com ampliações de 2000x para mostrar detalhes do entalhe, bem como permitir a medida do raio de curvatura da ponta dos mesmos com maior precisão. O raio de curvatura é um parâmetro importante na aplicação do método SEVNB para determinação de  $K_{IC}$  de cerâmicas avançadas. Segundo a literatura, o raio de curvatura deve ser menor que duas vezes o tamanho do grão do material, sendo, nesse caso, desnecessária qualquer correção no cálculo de  $K_{IC}$  [10, 11, 13]. Observando as Figs. 3 (a e b) pode-se dizer que o raio das pontas dos entalhes mostrados nas Figs. 6 (a e b) são em média muito menores que o tamanho médio de grão para as duas cerâmicas de SiC. Os raios de curvatura medidos são, respectivamente, 6  $\mu\text{m}$  e 4  $\mu\text{m}$ , para as cerâmicas SiCYb e SiCDy. Dessa forma o método SEVNB pode ser plenamente aplicado para determinar  $K_{IC}$  dessas cerâmicas. A Fig. 6 (c) mostra o entalhe produzido na amostra de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sinterizada a 1450 °C. Percebe-se que o entalhe foi obtido com sucesso,

pois seu raio de curvatura pôde ser medido com precisão, 42  $\mu\text{m}$ . Na Fig. 6 (d) pode-se observar o entalhe em V produzido na amostra de telha cerâmica, verificando que o entalhe está dentro dos padrões da norma ISO 23146:2008 [11], ou seja, com uma geometria possível de acomodar uma circunferência com o raio de 59  $\mu\text{m}$ . Observando os entalhes mostrados nas Figs. 6 (a-d) percebe-se que, quanto maior a resistência à abrasão menor é o raio de curvatura do entalhe, pois no SiC o raio de curvatura do entalhe é muitas vezes menor que no  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , que por sua vez é menor que na telha. Esse comportamento pode ser atribuído a um maior desgaste lateral do entalhe pelas pastas de diamante, no caso da cerâmica da telha e do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  quando comparadas com as de SiC. Vale ressaltar que todas as amostras foram submetidas às mesmas condições de entalhamento.

A Tabela II mostra os resultados de absorção de água, AA, massa específica aparente, MEA, porosidade aparente, PA e de tenacidade à fratura medidas pelos métodos IF e

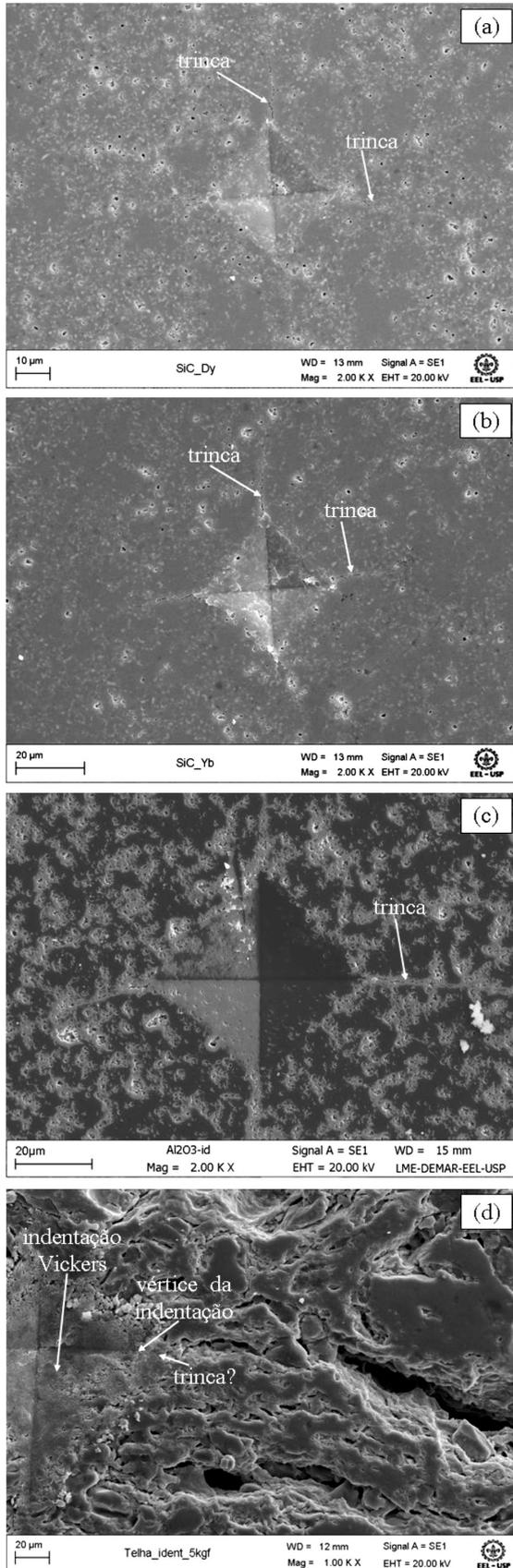


Figura 5: Indentações Vickers nas cerâmicas de: (a) SiCDy, (b) SiCYb, (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e (d) telha.  
 [Figure 5: Vickers indentations on the ceramics of: (a) SiCDy, (b) SiCYb, (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and (d) roofing tile.]

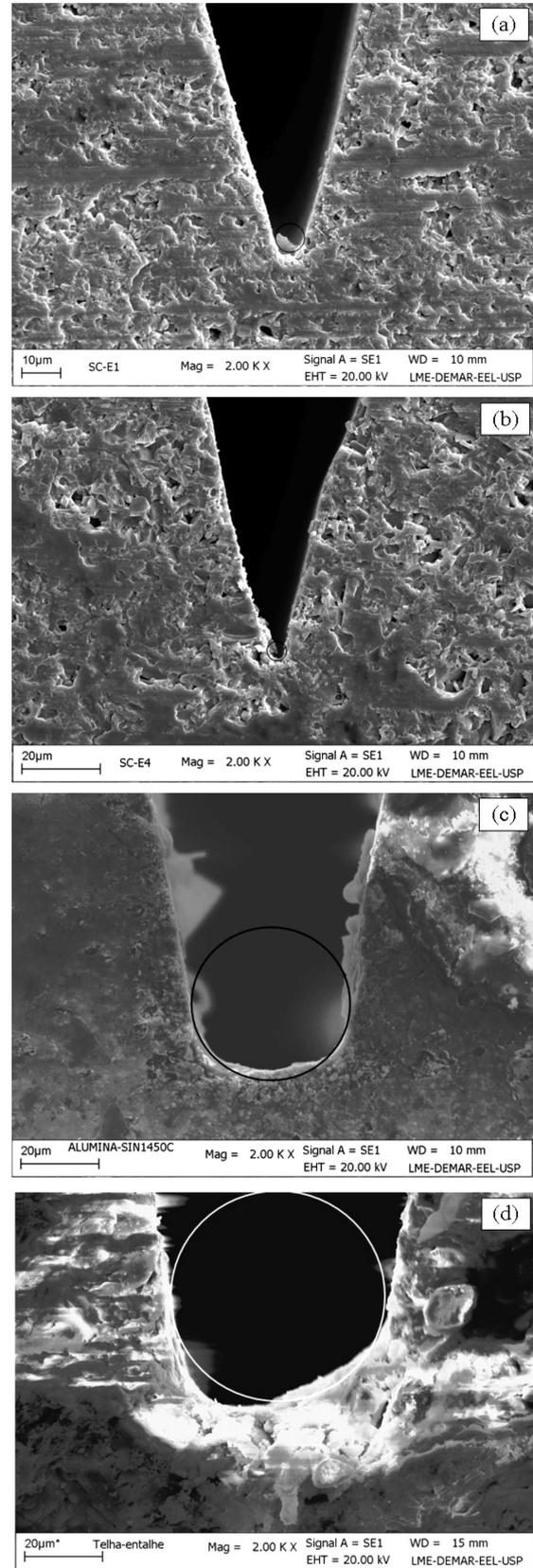


Figura 6: Micrografias obtidas por MEV das amostras: (a) SiCYb, (b) SiCDy sinterizadas a 1950 °C, por 1 h; (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sinterizada a 1450 °C por 2 h e (d) telha.  
 [Figure 6: SEM images of: (a) SiCYb, (b) SiCDy sintered at 1950 °C for 1 h; (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sintered at 1450 °C for 2 h and (d) roofing tile.]

Tabela II - Resultados de AA, MEA, PA e  $K_{IC}$  para as quatro cerâmicas estudadas.

[Table II - Results of water absorption, apparent density, apparent porosity and fracture roughness for the ceramics.]

Amostra	AA (%)	MEA (%)	PA (%)	$K_{IC}$ MPa.m <sup>1/2</sup>	
				IF	SEVNB
SiCDy	0,51 ± 0,01	3,21 ± 0,09	1,62 ± 0,07	4,74 ± 0,16	3,78 ± 0,01
SiCYb	1,49 ± 0,02	3,20 ± 0,08	4,78 ± 0,09	4,48 ± 0,25	3,82 ± 0,04
Alumina	4,25 ± 0,08	3,32 ± 0,13	14,05 ± 0,39	3,95 ± 0,32	2,41 ± 0,15
Telha	10,34 ± 0,16	2,06 ± 0,01	21,29 ± 0,27	impossível	0,44 ± 0,04

SEVNB, das cerâmicas de SiC, de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e da telha.

É importante dizer que AA, MEA e PA, no caso de cerâmicas técnicas, não são comumente medidas por imersão em água, e sim mais utilizadas para cerâmicas tradicionais, entretanto, os resultados para o SiC e para alumina são aceitáveis e se mostraram bem menos porosas que a telha, o que era esperado. Os resultados obtidos de massa específica aparente por imersão em água foram validados pelo método geométrico, mostrando-se compatíveis.

Os resultados de tenacidade à fratura obtidos pelo método SEVNB são ligeiramente menores que os obtidos por IF para as cerâmicas de SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, sendo comparáveis aos encontrados na literatura [1, 3, 4, 7]. É importante observar que apesar dos resultados de  $K_{IC,SEVNB}$ , serem menores que  $K_{IC,IF}$ , são estatisticamente mais significativos, pois os desvios são menores para o caso do  $K_{IC,SEVNB}$ . A maior precisão de  $K_{IC,SEVNB}$  em relação  $K_{IC,IF}$  é devido ao número de variáveis utilizadas no método da indentação, além de empregar avaliações subjetivas e passíveis de erros grosseiros, como por exemplo, a extensão das trincas nos vértices das indentações. Quanto mais poroso é o material, maior a dificuldade de se avaliar o comprimento da trinca. No caso do método SEVNB essas dúvidas não ocorrem, pois depende de medidas mais confiáveis.

Outro fator importante observado nos testes de flexão das barras entalhadas foi que todos os materiais ensaiados apresentaram curvas carga-deslocamento com formato típico de fratura catastrófica, ou seja, não houve encurvamento no máximo da curva. Essa condição é necessária para não superestimar resultados de tenacidade à fatura.

No caso das amostras da telha não foi possível determinar o valor de  $K_{IC}$  pelo método IF, pois como já exposto, não foi possível medir a extensão das trincas produzidas pelas indentações Vickers, conforme mostrado na Fig. 5d. O valor encontrado de  $K_{IC}$  para a telha está de acordo com os encontrados na escassa literatura, que é da ordem de 0,3 a 1 MPa.m<sup>1/2</sup> [8].

## CONCLUSÕES

O raio de curvatura dos entalhes em V para medida da tenacidade à fratura depende da porosidade da cerâmica, pois os resultados desse trabalho mostraram que para os mesmos parâmetros utilizados durante todo o procedimento, até chegar ao entalhe final, a cerâmica a base de argila (telha cerâmica) de maior porosidade, apresentou entalhe com raio

de curvatura muito maior. A mesma relação é encontrada quando se comparam as cerâmicas de alumina e as de SiC produzidas neste trabalho. O método SEVNB mostra que, sob o ponto de vista estatístico, é mais preciso que o método IF, avaliado pelos desvios apresentados nos resultados obtidos. O método de medida da tenacidade à fratura SEVNB pode ser aplicado para cerâmicas porosas com êxito, pelo menos até o nível medido nesse trabalho, trazendo benefícios para a área de caracterização de cerâmicas tradicionais e também para as avançadas porosas. A divulgação do método SEVNB é bastante importante, já que a produção do entalhe com detalhes específicos não é mais um problema, o que antes justificava o emprego do método IF.

## AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Proc. 2010/51925-6), ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa (Procs. 303061/2009-0 e 304760/2010-2), à CAPES pela bolsa de doutorado atribuída ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da EEL.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y. Torres, D. Casellas, M. Anglada, L. Llanes, Int. J. Refract. Metals & Hard Mat. **19** (2001) 27-34.
- [2] H. Özçoban, H. Jelito, G. A. Schneider, J. Eur. Ceram. Soc. **30** (2010) 1579-1583.
- [3] A. Malinge, A. Coup, S. Jouannigot, Y. L. Petitecorps, R. Pailler, P. Weisbeckrt, J. Eur. Ceram. Soc. **32** (2012) 4419-4426.
- [4] K. Strecker, S. Ribeiro, M. J. Hoffmann, Mater. Res. **8**, 2 (2005) 121-124.
- [5] G. A. Gogotsi. Ceram. Int. **29** (2003) 777-784.
- [6] H. Wang, P. Pallav, G. Isgro, A. J. Feizer, Dental Mater. **23** (2007) 905-910.
- [7] K. Strecker, S. Ribeiro, R. Oberacker, M. J. Hoffmann, J. Refrac. Mater. Hard Mater. **22** (2004) 169-175.
- [8] K. Ikeda, H-S. Kim, K. Kaizu, A. Higashi, J. Am. Ceram. Soc. **24** (2004) 3671-3677.
- [9] J. M. Calderon-Moreno, M. Popa, Mater. Sci. Eng. A. **321** (2001) 692-696.
- [10] H. Fischer, A. Waindich, R. Telle, Dental Mater. **24** (2008) 618-622.
- [11] ISO 23146:2008 Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) - Test methods for fracture

toughness of monolithic ceramics - Single-edge V-notch beam (SEVNB) method (2008) 19 p.

[12] S. R. Choi, J. P. Gyekenyesi, "Assessments of fracture toughness of monolithic ceramics - SEPB versus SEVNB methods", 11<sup>th</sup> Int. Conf. Fracture, ICF, ESIS, and ASTM, Turin, Italy, March 20-25, 2005 - Publ. NASA - National

Aeronautics and Space Administration (2006).

[13] S. Ribeiro, I. Atilio, M. R. Oliveira, G. C. R. Garcia, J. A. Anchieta, *Cerâmica* **59**, 350 (2013) 285-292.

[14] I. Yakub, J. Du, W. O. Soboyejo, *Mater. Sci. Eng. A.* **558** (2012) 21-29.

(*Rec. 05/09/2013, Ac. 10/09/2013*)