

TENACIDADE À FRATURA DE CERÂMICAS ÓXIDAS - AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO ¹

Luiz Alberto Santos ²
Renato Chaves Souza ³
Claudinei dos Santos ⁴
Kurt Strecker ⁵
Felipe Antunes Santos ⁶
Sebastião Ribeiro ⁴
R. Oberacker ⁷

Resumo

O objetivo desse trabalho foi a determinação da tenacidade à fratura de diferentes cerâmicas oxidas para uso na odontologia e a comparação das técnicas. Corpos-de-prova cerâmicos devidamente sinterizados a base de Al_2O_3 , $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$, $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ nanocristalina, e os compósitos $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ e $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ foram confeccionados com dimensões aproximadas de 3x4x45mm. Suas superfícies foram devidamente lixadas e polidas e em seguida submetidas à medição de tenacidade a fratura pelos métodos de indentação Vickers seguindo a norma ASTM C 1421-99, na qual mede-se o tamanho da trinca gerada pela impressão Vickers na superfície da cerâmica; e pelo método SEVNB (Single-Edge-V-Notched Beam) o qual determina os valores de tenacidade a partir da resistência a fratura de uma superfície contendo um entalhe previamente gerado na superfície de tração.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura; Cerâmicas; Indentação Vickers; Método SEVNB.

FRACTURE TOUGHNESS OF THE OXIDE CERAMICS –DETERMINATION USING DIFFERENT METHODS

Abstract

The objective of this work was the determination of the fracture toughness of different ceramics used as dental materials, comparing two different testing methods. Sintered samples based on Al_2O_3 , $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$, $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ nanoparticled, and composites $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ and $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ were produced with dimensions near to 3x4x45mm. Surfaces were polished and fracture toughness was determined by Vickers indentation method according ASTM C 1421-99 standard, in which crack length is measured starting indentation on ceramic polished-surface, and by SEVNB (Single-Edge-V-Notched Beam) method, in which the fracture toughness results are determined in polished surface containing an edge generated on the tensile polished-surface.

Key words: Fracture toughness; Ceramics; Vickers indentation; SEVNB method.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Aluno de iniciação Científica do curso de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo - EEL-USP*

³ *Professor da Escola Técnica Federal - CEFET-SP*

⁴ *Professor do curso de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo - EEL-USP*

⁵ *Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João Del'Rei - UFSJ*

⁶ *Aluno de Doutorado do curso de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo - EEL-USP*

⁷ *Professor e pesquisador da Universidade de Karlsruhe- Alemanha.*

1 INTRODUÇÃO

Materiais cerâmicos a base de alumina e zircônia (Al_2O_3 e ZrO_2) possuem biocompatibilidade. Os desenvolvimentos em melhoria da resistência mecânica (capacidade de tenacificação e boa resistência à fratura) e ganhos na confiabilidade fazem desses cerâmicos ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$), substitutos naturais em componentes protéticos restauradores, com vantagens de possuírem baixo custo, excelente estética, adaptabilidade e resistência mecânica. A tenacidade à fratura é um importante critério de projeto para confecção de implantes odontológicos à base de materiais cerâmicos, devido às cargas mastigatórias envolvidas no processo de mastigação. Porém o método mais utilizado para avaliação da tenacidade à fratura é o método de indentação e medida das trincas. Por causa das incertezas, envolvidas no método de indentação e medição de trincas, ultimamente foi proposto o uso do método SEVNB (Single-Edge-V-Notched Beam) para avaliação da tenacidade à fratura.

A confiabilidade do método SEVNB deve-se ao fato de que ao se introduzir um entalhe no corpo-de-prova fica conhecido o valor do tamanho da falha inicial, desta forma certifica-se que a trinca propagará no modo I de fratura e elimina a possibilidade de se ter influência de imperfeições na ponta de início da propagação da trinca. Para determinação da tenacidade à fratura pelo método SEVNB, o teste por flexão 3 ou 4 pontos são considerados idênticos pelo fato de não haver diferenças essenciais nos resultados de tenacidade à fratura.

1.1 Tenacidade à Fratura

A resistência mecânica de cerâmicas para falhas catastróficas pode ser descrita pela tenacidade à fratura do material, o qual é definido como o nível de intensidade de tensão crítico a que uma dada falha inicia o crescimento, devido às solicitações mecânicas as quais os implantes dentários estão subjugados durante processos de mastigação. O modo I refere-se à abertura de uma falha sob a ação de uma tensão de tração normal à trajetória da trinca.⁽¹⁾ Desta maneira, K_{IC} caracteriza a tenacidade à fratura no modo I de falha. Em contraste ao modulo de ruptura do teste de resistência, K_{IC} fornece um critério de falha que não é afetado pelos concentradores de tensão agindo na superfície da amostra.⁽²⁾

A técnica de SEVNB⁽³⁻⁶⁾ foi introduzida recentemente, consistindo em que um entalhe final em V afiado com seu raio variando de 10 a 20 μm é introduzido por polimento em uma seção pré-entalhada com a lâmina de barbear conjuntamente com a pasta de diamante.

Recentemente, muita atenção foi focalizada no método de SEVNB, que é um desenvolvimento mais aprimorado de um método simples e extensamente usado de barras entalhadas em corte simples (single edge notched beam-SENB) apropriado somente para avaliações grosseiras de tenacidade à fratura. Os dados obtidos do teste pelo método de SEVNB foram encontrados sendo comparáveis àqueles obtidos pelas barras pré-trincadas em corte simples (SEPB) considerado geralmente como fornecer os valores reais do fator intensidade de tensão crítico (K_{IC}), mas este teste é muitas vezes difícil de realizar na prática.

A comparação dos dados obtidos nos valores de K_{IC} em flexão de três e de quatro pontos aponta também o fato de que as diferenças essenciais são ausentes. Além disso, a flexão de quatro pontos pode ser mais facilmente aplicada na prática porque não requer uma colocação precisa das amostras entre os roletes, o que é

difícil de conseguir em flexão três pontos. Por outro lado, os testes de flexão de três pontos podem utilizar amostras de pequeno tamanho, que é vantajoso para a pesquisa da ciência de materiais. Os dados do teste confirmam que o método de SEVNB pode ser facilmente aplicado na prática e pode ser usado para a maioria das cerâmicas avançadas e de compósitos de cerâmicos particulados em temperaturas diferentes e no ambiente de oxidação, além do que estes dados são independentes do tipo de flexão e exibem pouco espalhamento.⁽⁷⁾

A fratura ocorre quando o nível de tensão aplicado ultrapassa o valor crítico “ σ_c ”, indicado na equação 1. De modo semelhante o fator de intensidade de tensões na vizinhança, na ponta da trinca, mediante operações matemáticas envolvendo a geometria da trinca, chega-se à expressão:⁽¹⁾

$$K_{Ic} = Y \sigma_c \sqrt{\pi a} \dots \quad (1)$$

Nesta igualdade: “Y” representa um fator que depende a geometria da trinca; “ σ_c ” a tensão limite do avanço da trinca e “a” vem a ser a metade do comprimento de uma trinca interna.

A título de informação a Tabela 1 apresenta valores de resistência e tenacidade à fratura, para alguns materiais de uso corrente.

Tabela 1–Resistência à Flexão e Tenacidade à Fratura de alguns materiais de uso corrente.

MATERIAL	Resistência à Flexão (MPa)	Tenacidade à fratura (MPa.m ^{1/2})
Porcelana Feldspática	100 a 200	0,9 a 1,5
Alumina infiltrada com Vidro	256 a 500	4,4 a 4,8
ZrO ₂ estabilizada com Ítria	900 a 1200	7 a 12
Dente Humano(3 ^o Molar)	--	0,77
Alumina	200	2,5 a 4,6
Vidro	50 a 100	0,7 a 0,8
Poliestireno	--	0,7 a 1,1
Polycarbonato	--	2,0

A falha ocorre por Mecânica da Fratura quando o campo de tensões na ponta da trinca excede um valor crítico ou quando o valor de intensidade de tensão excede um valor crítico K_{Ic} . O tamanho crítico de trinca pode ser então obtido por:

$$a_{crit.} = \frac{K_c^2}{Y^2 \sigma^2 \pi} \quad (2)$$

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Processamento

Os materiais que foram utilizados neste trabalho são: Zircônia (ZrO₂) tetragonal estabilizada com ítria (3% mol) adquirida da ProtMat materiais avançados –Brasil, com diferentes tamanhos de grão; óxido de alumínio (Al₂O₃), tipo SG-1000 da Almatiss (grupo Alcoa). A partir destes pós, foram preparadas composições de mistura variando o percentual de adição de alumina na zircônia, em 20% em peso. As matérias-primas foram misturadas via úmido com moinho de atrito, em meio a álcool isopropílico e agitadas a 1.000 RPM por 4 horas. Após a moagem, foi efetuada a secagem dessas misturas, utilizando absorção a vácuo do líquido em

excesso, e em seguida, estufa a 90°C, por 24h. Os pós foram desagregados em almofariz de ágata e submetidas ao peneiramento utilizando peneiras de até 32 m.

Foram confeccionados corpos (placas) à verde com medidas de 114 x 25 mm, para posterior desenvolvimento dos corpos-de-prova dos ensaios de fadiga e flexão (3 x 4 x 45 mm). O pistão e as paredes da matriz foram lubrificadas com estearina para minimizar os efeitos do atrito durante a compactação. Foi executada uma prensagem uniaxial a frio sob pressão de 50 MPa, por 30s.

As amostras foram sinterizadas na temperatura de 1.600°C por 120 minutos, com taxas de aquecimento foram de 10°C/min até 1.100°C, 5°C/min até 1.400°C e 3°C/min até a temperatura final. A taxa de resfriamento foi máxima de 10°C/min até temperatura ambiente seguindo a inércia do forno. Após a sinterização, as placas foram cortadas e retificadas em barras retangulares para realização dos ensaios de flexão em quatro pontos e fadiga cíclica (3 x 4 x 45 mm). Após o desbaste, as amostras foram polidas com pastas de diamante na seqüência de 15 µm, 9 µm, 6 µm, 3 µm e 1 µm.

2.2 Caracterizações

As fases presentes foram identificadas por difração de raios X, utilizando radiação Cu-K α com varredura entre 20° e 80°, aplicando-se passo de 0,05° e 3s/contagem. A massa específica dos corpos a verde foi determinada pelo método geométrico e pela pesagem das amostras. As amostras sinterizadas foram caracterizadas pela perda de massa através das medições de massa antes e após a sinterização. O cálculo da massa específica das amostras sinterizadas foi executado utilizando o princípio de Arquimedes. Observações dos materiais sinterizados por MEV (LEO 1450VP com WDS acoplado) foram executadas, no Laboratório de Microscopia do DEMAR-EEL-USP. Para revelação dos contornos de grão, as superfícies polidas sofreram ataque térmico, ao ar, a 1.500°C, por 15 min.

2.3 Propriedades Mecânicas

2.3.1 Dureza Vickers (HV)

A metodologia utilizada para a determinação dos valores de dureza das amostras seguiu a norma ASTM C 1327-99, a qual fornece o método de teste padrão para a obtenção da dureza Vickers de cerâmicas avançadas. Por razões estatísticas, foram realizadas 20 impressões Vickers nas superfícies de cada uma das amostras polidas, utilizando-se uma carga de 2000 Kgf aplicada durante trinta segundos. A Figura 1 apresenta de forma esquemática uma indentação Vickers. As distâncias entre os centros das impressões é quatro vezes a diagonal da indentação (4d).

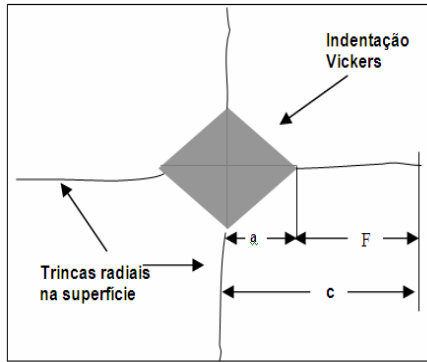


Figura 1- Desenho esquemático da indentação Vickers.

Foi utilizado microdurômetro modelo Micromet 2004. Após a medição das diagonais de impressão, foram calculados os valores da dureza Vickers do material (GPa), conforme a Equação (3):

$$HV = 0,0018544 \left(\frac{P}{d^2} \right) \quad (3)$$

Onde: HV = Dureza Vickers (GPa); P = carga aplicada (N); d = média aritmética do comprimento das duas diagonais (mm).

2.3.2 Tenacidade à fratura (K_{IC})

Método 1: A metodologia utilizada para a determinação dos valores de tenacidade à fratura das amostras seguiu a norma ASTM C 1421-99.⁽⁸⁾ A tenacidade à fratura foi calculada a partir dos resultados de dureza obtidos, medindo-se o comprimento de trinca em cada vértice das indentações piramidais. Foi calculado o comprimento médio de trinca para cada uma das 21 indentações para obtenção da tenacidade das amostras (K_{IC}), utilizando a Equação (4).

$$K_{IC} = 0,016 \left(\frac{E}{H_V} \right)^{1/2} \cdot P \cdot b^{-3/2} \quad (4)$$

Onde: K_{IC} = Tenacidade à fratura [MPa.m^{1/2}] E = Módulo de elasticidade [GPa] = 290 GPa [17] H_V = Dureza Vickers [Gpa] P = Carga de indentação [MPa] b = Comprimento médio de trinca [m].

A medida do comprimento das trincas foi realizada logo após o ensaio de dureza, buscando evitar o crescimento lento de trinca após a impressão, iniciado pelo campo de tensão que atua após o carregamento.

Método 2:

O método SEVNB (Single-Edge-V-Notched Beam) para a determinação da tenacidade à fratura é agora um método aceito para a determinação da tenacidade à fratura⁽³⁾ que permite obter valores confiáveis e que é também um método de relativamente fácil condução experimental. No caso de um dispositivo de flexão em 4 pontos com apoios de 40 e 20mm, a tenacidade à fratura é calculada pelas Equações (5) a (7):

$$K_{IC} = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot Y = \frac{F}{B \cdot \sqrt{W}} \cdot \frac{(S_1 - S_2)}{W} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{a}}{2 \cdot (1 - \alpha)^{1.5}} \cdot Y \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{a}{W} \quad (6)$$

$$Y = 1,9887 - 1,326\alpha - \frac{(3,49 - 0,68\alpha + 1,35\alpha^2) \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)}{(1 + \alpha)^2} \quad (7)$$

Onde: K_{Ic} = a tenacidade à fratura, σ = resistência à fratura, F = carga de ruptura, B = altura da amostra, W = largura da amostra, S_1 = distância entre os apoios externos, S_2 = distância entre os apoios internos, ao comprimento médio do corte, α = profundidade relativa do corte e Y um fator geométrico.

2.3.3 Resistência à flexão (4 pontos)

A resistência a fratura (σ_f) foi determinada pelo ensaio de flexão em 4 pontos seguindo a norma DIN EM 843-1 (ASTM C 1161-90), à temperatura ambiente, com velocidade de carregamento de 0,5 mm/min com espaçamentos de 40 e 20 mm entre os roletes (l_1 e l_2), utilizando máquina universal de ensaios mecânicos, MTS-250kN. A resistência à flexão dos corpos de prova foi calculada utilizando a equação 8:

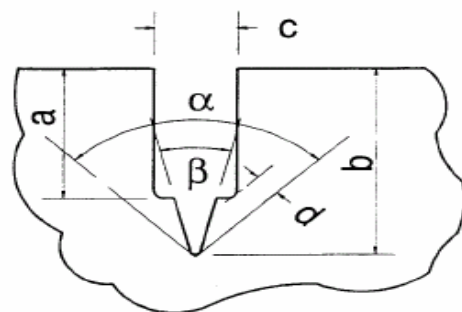


Figura 2- Entalhe produzido por um disco de corte diamantado e afilado com uma lâmina de barbear.

$$\sigma_f = \frac{3}{2} F_A \times \frac{(l_1 - l_2)}{b \times h^2} \quad (8)$$

Onde: σ_f = resistência à flexão [MPa]; F_a = carga de ruptura [N]; b = base das amostras [mm]; h = altura das amostras [mm]; l_1 = espaçamento maior entre os roletes de carregamento [mm]; l_2 = espaçamento menor entre os roletes de carregamento [mm].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Difração de Raios-X

A Figura 3 apresenta a difração de Raios-X da cerâmica α - Al_2O_3 e ZrO_2 .

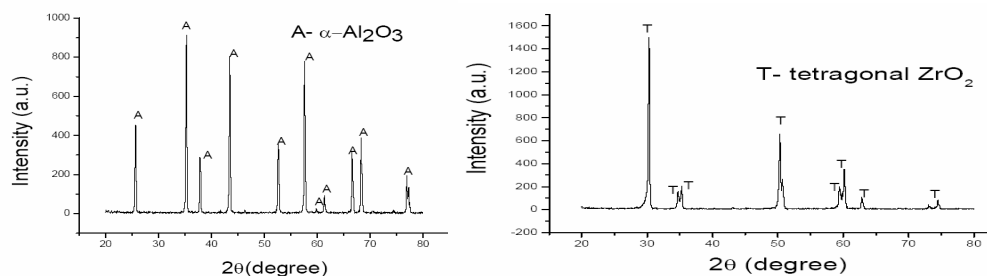


Figura 3– Difratograma de raios X das amostras de Al_2O_3 e ZrO_2 após sinterizadas.

É observado que as amostras apresentam apenas a fase corundum ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) como fase cristalina. Ao lado temos a difração de Raios-X da cerâmica ZrO_2 do tipo micrométrica utilizada no trabalho, após a sinterização, há somente a fase tetragonal, indicando que toda a ZrO_2 monoclinica inicial presente no pó de partida, foi estabilizada durante o tratamento térmico realizado. A Figura 4 mostra a difração de Raios-X do compósito cerâmico $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ e $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$.

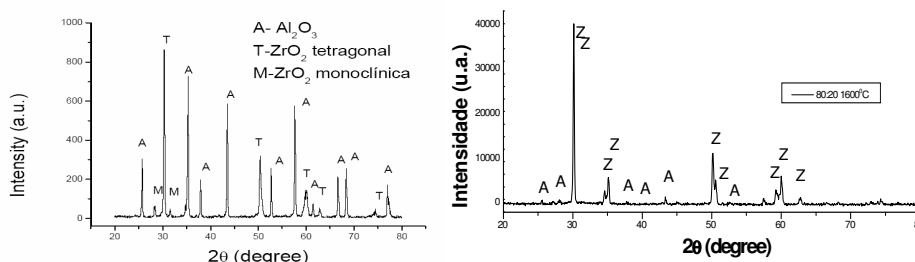


Figura 4 – Difratoograma de Raios-X dos compósitos $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ e $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ após sinterização.

Este compósito apresenta, após a sinterização, as fases ZrO_2 monoclinica, ZrO_2 tetragonal, além da fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. A presença da fase monoclinica indica que tensões térmicas residuais podem ter ocorrido durante o resfriamento. É possível, pois o processo de mistura/moagem, o qual pode não ter sido bem realizado permitindo regiões ricas em uma das fases. No compósito $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ é possível notar a presença da fase ZrO_2 integralmente tetragonal, além da fase $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. A Figura 5 compara os difratogramas de raios X das zirconias micrométricas e nanométricas.

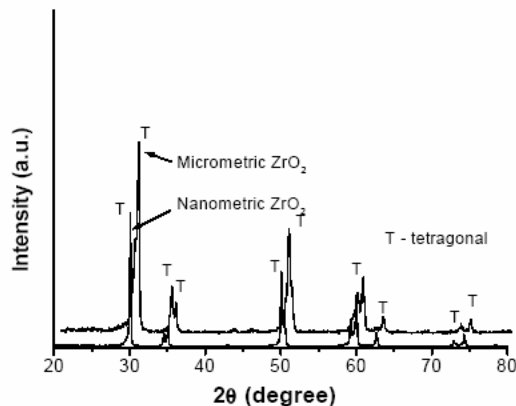


Figura 5 – Difratoograma de Raios-X das amostras ZrO_2 micrométrica e ZrO_2 nanométrica após sinterização.

Esse material apresenta, após a sinterização, a fase ZrO_2 tetragonal em ambas amostras, indicando que a temperatura de sinterização permitiu total estabilização da fase monoclinica em tetragonal, independentemente do tamanho original do pó. Essa fase é importante pois a partir de sua presença os materiais apresentam alta tenacidade a fratura devido ao mecanismo de tenacificação por transformação de fases.⁽⁹⁾

3.2 Densidade Relativa

Os resultados da densidade relativa das amostras sinterizadas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da densidade relativa das amostras após sinterização.

Material	Temperatura de sinterização (°C)	Densidade relativa (%)
ZrO ₂ micrométrica	1550	99,8 ±0,2
ZrO ₂ nanométrica	1300	94,1±0,5
ZrO ₂ nanométrica	1350	99,8 ±0,2
ZrO ₂ - Al ₂ O ₃	1600	99,2±0,3
ZrO ₂ - Al ₂ O ₃ nanométrica	1400	99,5±0,3
Al ₂ O ₃	1600	97,5±0,7
Al ₂ O ₃ - ZrO ₂	1600	98,8±0,3

Os resultados encontrados nas amostras de Al₂O₃, Al₂O₃-ZrO₂ e ZrO₂ nanométrica (1.300⁰C) apresentam menores valores de densidades relativas indicando presença de poros na estrutura do material, e conseqüentemente isso poderá afetar nos resultados encontrados de propriedades mecânicas. Diferentemente das amostras de ZrO₂ micrométrico, ZrO₂ nanométrica (1.350⁰C), ZrO₂-Al₂O₃ e ZrO₂-Al₂O₃ nanométrica apresentam maiores valores de densidades relativas indicando menor grau de porosidade.

MEV

As Figuras 6 a 9 apresentam micrografias de diferentes cerâmicas estudadas nesse trabalho.

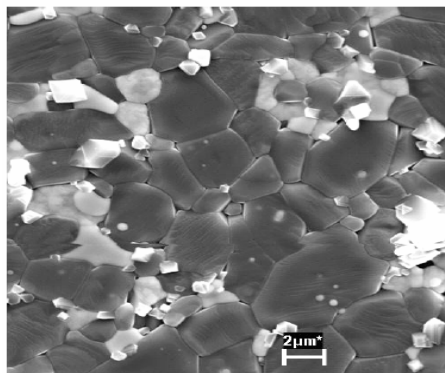


Figura 6 – Micrografia obtida por MEV da cerâmica Al₂O₃-ZrO₂

O tamanho médio dos grãos é de 2 µm e pela micrografia observamos que ocorreu aglomeração das partículas de Al₂O₃. Observamos que as partículas de Al₂O₃ não ficaram devidamente distribuídas na amostra possivelmente pela deficiência do processo de moagem.

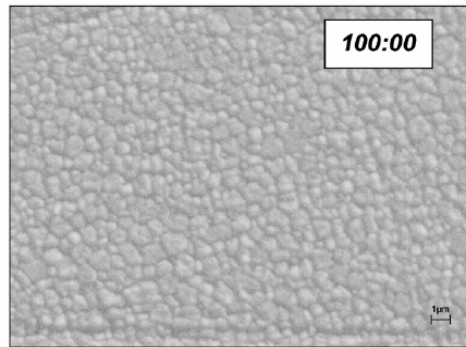


Figura 7 – Micrografia obtida MEV da cerâmica ZrO_2 .

O tamanho médio das partículas é de $1\ \mu m$ da cerâmica ZrO_2 . Observamos que não há variações consideráveis nos tamanhos dos grãos analisados. Além disso, a presença da fase tetragonal identificada nos difratogramas possibilitará uma maior valor de resistência mecânicas das amostras.

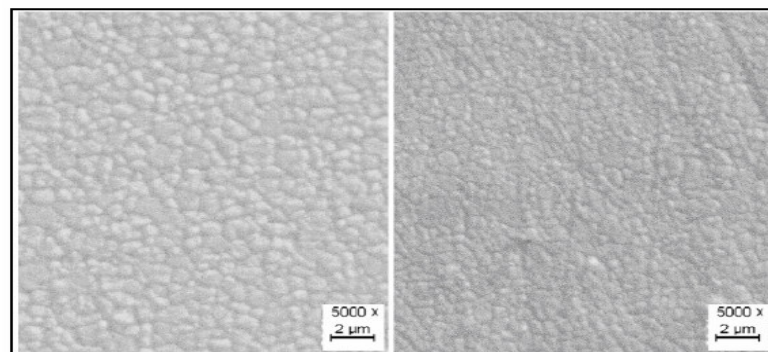


Figura 8 – Micrografia obtida por MEV da análise comparativa de ZrO_2 micrométrica e nanométrica

O tamanho médio dos grãos é de $0,6\ \mu m$ da cerâmica ZrO_2 micrométrica e de $0,2\ \mu m$ para a nanométrica. Temos uma análise comparativa dos tamanhos das partículas observada pelo microscópio eletrônico de varredura. A Figura 9 mostra uma micrografia do compósito 80:20 $ZrO_2-Al_2O_3$ sinterizada na temperatura de $1.600^\circ C$ com tamanho médio das partículas é menor que $1\ \mu m$.

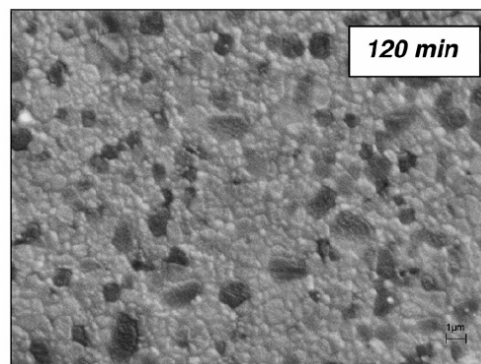


Figura 9 - A micrografia do compósito 80:20 $ZrO_2 - Al_2O_3$ sinterizada na temperatura de $1.600^\circ C$

3.3 Propriedades Mecânicas

A Tabela 3 apresenta o resumo das propriedades mecânicas avaliadas para diferentes cerâmicas sinterizadas.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas das amostras sinterizadas

Material	HV (GPa)	K _{IC} (indentação)	K _{IC} (SEVNB)	σ _f (4 pontos)
ZrO ₂ micrométrica	12,9 ± 0,3	9,1 ± 0,3	8,4 ± 0,15	850 ± 40
ZrO ₂ nanométrica(1300 ^o C)	12,2 ± 0,7	8,4 ± 0,4	7,4 ± 0,6	810 ± 30
ZrO ₂ - Al ₂ O ₃	15,2 ± 0,3	8,2 ± 0,5	7,1 ± 0,3	780 ± 40
ZrO ₂ - Al ₂ O ₃ nanométrica	15,3 ± 0,4	10,5 ± 0,3	9,7 ± 0,4	840 ± 50
ZrO ₂ nanométrica (1350 ^o C)	13,2 ± 0,2	11,3 ± 0,2	10,1 ± 0,3	1020 ± 40
Al ₂ O ₃	15,3 ± 0,5	4,5 ± 0,5	3,4 ± 0,2	380 ± 90
Al ₂ O ₃ - ZrO ₂	14,1 ± 0,9	7,2 ± 0,4	5,3 ± 0,5	620 ± 30

Os resultados indicam que a Al₂O₃ apresenta valores inferiores de tenacidade à fratura e resistência à flexão do que os outros materiais analisados. Com relação à dureza, o material apresentou dureza Vickers da ordem de 15,3 GPa. Estes resultados estão coerentes com resultados apresentados na literatura. Os materiais nanométricos, compósitos ZrO₂-Al₂O₃ e ZrO₂ apresentaram maiores resultados de tenacidade à fratura e resistência a flexão, quando comparados com seus similares de microestrutura micrométrica. Em geral, a utilização de materiais nanoestruturados leva a um aumento médio de 10% a 20% na resistência a fratura por flexão.

Em respeito à tenacidade a fratura pode ser observado que os valores obtidos para a técnica de indentação Vickers são sempre superiores aos valores encontrados para a técnica SEVNB, com diferenças que podem variar de 8 a 30%, dependendo do tipo de material analisado. Essas diferenças podem ser relacionadas a microestrutura e aos campos de tensão que são gerados ao redor da indentação e que interferem diretamente nos resultados obtidos pela técnica de indentação Vickers. No caso das medidas realizadas pela técnica SEVNB, os resultados apesar de inferiores, são muito mais próximos da realidade e, portanto mais confiáveis. Isso ocorre pelo fato de que nesses materiais um entalhe e gerado propositadamente sendo este o ponto iniciador do processo de fratura, e por onde, necessariamente, os materiais terão a propagação da trinca. Conhecendo as dimensões dessa trinca e relacionando com as equações apresentadas anteriormente, pode-se prever a resistência à fratura do material, conhecendo os seus parâmetros fundamentais como módulo de elasticidade.

4 CONCLUSÕES

Diferentes materiais cerâmicos com potencial uso na confecção de materiais dentários foram processados em variados ciclos de sinterização e submetidos em dois diferentes tipos de avaliação de resistência mecânica. A técnica de indentação Vickers apresenta a vantagem de ser uma técnica simples e rápida que permite além da dureza Vickers, a tenacidade à fratura. Como desvantagem, está o fato de os resultados de tenacidade serem determinados a partir de trincas geradas como resposta a compressão realizada pelo indentador. Essas trincas estão sujeitas a uma série de esforços de dimensões e formas variadas, que geram como resposta,

reflexos no crescimento das trincas, que por sua vez não refletirão os resultados reais de tenacidade à fratura desses materiais. Como alternativa o método SEVNB, que necessita de muito mais etapas preparatórias, permite que os resultados sejam mais confiáveis apesar de menores. Por ser realizado com a premissa de que apenas esforços trativos sejam realizados na superfície de fratura, e por possuir um entalhe previamente gerado que irá ser necessariamente o propagador da trinca, os resultados são mais próximos da realizado dos materiais, sendo então sugeridos para quando as aplicações são mais exigentes quanto a confiabilidade, como em aplicações em sistemas de próteses.

Agradecimentos

A FAPESP pelo apoio financeiro (processos 04/04386-1 e 06/50510-1).

REFERÊNCIAS

- 1 MUNZ, D., FETT., T., *Ceramics – Mechanical properties, failure behavior, materials selection*, Springer, 1999, London.
- 2 MECHOLSKY J.J., BARKER, L.M., A. Chevron Notch Specimen for Fracture Toughness Measurements of Ceramic-Metal Interfaces, ASTM Special Technical Publication, STP 855 (1985).
- 3 KÜBLER J., Fracture toughness of ceramics using the SEVNB method: preliminary results, in: J.P. Singh (Ed.), *Ceramic Engineering & Science Proceedings*, American Ceramic Society, Vol. 18, Issue 4, 1997, pp. 155–162.
- 4 KÜBLER J., Fracture Toughness of Ceramics Using the SEVNB Method: Round Robin, VAMAS Report No.37/ESIS Document D2-99, EMPA. , Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland (1999).
- 5 DAMENY, D.J., DANZER, A., Method for fracture toughness testing of ceramics-ready for standardisation, in: M.W. Brawn, E.R. Riosand, K.J. Miller (Eds.), *Fracture from Defects*, Emas Publishing, 1998, pp. 491–496.
- 6 GOGOTSI, G.A. Fracture toughness of ceramics and ceramic matrix composites (SEVNB Method). *Refractory and Technical Ceramics* 11–12 (1998), pp. 7–13.
- 7 GOGOTSI, G.A. Fracture toughness of ceramics and ceramic composites *Ceramics International* 29 (2003) 777–784.
- 8 ASTM C1421-99, Standard Test Method for the Determination of Fracture Toughness of Advanced Ceramics at Ambient Temperature.
- 9 STEVENS, R., *An introduction to zirconia: Zirconia and zirconia ceramics*. 2nd Ed Twickenham: Magnesium elektrum, 1986, (Magnesium Elektron Publications, n113).