

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
E CIÊNCIAS DE MATERIAIS**

JULIANO SWIECH CIESIELSKI

TENACIFICAÇÃO DE LAMINADOS CERÂMICOS: MULITA E MONOPOROSA

**PONTA GROSSA
2012**

JULIANO SWIECH CIESIELSKI

TENACIFICAÇÃO DE LAMINADOS CERÂMICOS: MULITA E MONOPOROSA

**Dissertação de Mestrado apresentado
para obtenção do título de mestre na
Universidade Estadual de Ponta
Grossa, Área de Engenharia e Ciência
de Materiais.**

Orientador: Prof. Dr. Sidnei A. Pianaro

**PONTA GROSSA
2012**

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Ciesielski, Juliano Swiech
C569 Tenacificação de laminados cerâmicos:
 mulita e monoporosa/ Juliano Swiech
 Ciesielski. Ponta Grossa, 2012.
 42f.

 Dissertação (Mestrado em Engenharia e
 Ciência de Materiais - Área de
 Concentração: Desenvolvimento e
 Caracterização de Materiais), Universidade
 Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador: Prof. Dr. Sidnei Antonio
 Pianaro.

 1.Laminados. 2.Deformação. 3.Energia de
 fratura. I.Pianaro, Sidnei Antonio. II.
 Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Mestrado em Engenharia e Ciência de
 Materiais. III. T.

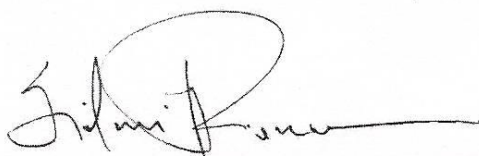
CDD: 620.14

JULIANO SWIECH CIESIELSKI

TENACIFICAÇÃO DE LAMINADOS CERÂMICOS: MULITA E MONOPOROSA

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa, Área de Engenharia e Ciência de Materiais.

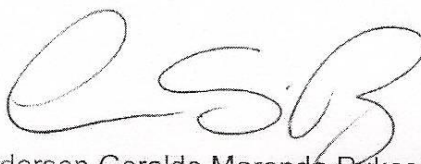
Ponta Grossa, 31 de julho de 2012



Prof. Dr. Sidnei Antônio Pianaro (Orientador)
Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, Departamento de Engenharia
e Ciência de Materiais



Prof. Dr. Sergio Mazurek Tebcherani
Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, Departamento de Química



Prof. Dr. Anderson Geraldo Marenda Pukasiewicz
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Departamento de
Mecânica

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e pela presença constante em todos os momentos.

Ao meu orientador professor pós - Doutor Sidnei Antônio Pianaro, agradeço por seus conselhos, advertências construtivas, a sua paciência e horas dedicadas as minhas dúvidas ao longo do programa de Pós Graduação.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-graduação que de alguma maneira me ajudaram a desenvolver e concluir meu projeto em especial, Professora Adriana Chinelatto, Professor Adilson Chinelatto, Professor Sérgio Tebcherani e ao Milton pela disposição e competência em todos os ensaios realizados.

A minha mãe Zélia, pela dedicação, advertências, educação, exemplo como pessoa e incentivo ao meu estudo desde pequeno, sem ela este trabalho não existiria.

Aos meus colegas do Programa e de Trabalho pelo companheirismo durante o período de obtenção dos créditos e ao longo das pesquisas desenvolvidas, em especial, Guilherme Bacci, Raphael Prestes.

A Irmã Leonilda Carmem de Souza diretora do Colégio Sagrada Família de Palmeira – PR e a Coordenadora pedagógica Joceli de Paula, jamais esquecerei o apoio destas pessoas.

A todos aqueles que me apoiaram e deram o devido valor ao meu trabalho.

RESUMO

Muitos dos compostos multicamadas são fabricados a partir de composições de cerâmica avançada, em que se busca elevado desempenho mecânico, a fabricação destes materiais a base de composições de cerâmicas estruturais tem sido muito pouco estudado. Com o objetivo de aumentar a energia de fratura em cerâmicas tradicionais, foi pesquisado nesse trabalho o comportamento mecânico de um sistema multicamadas formado pelo empilhamento de mulita e monoporosa. A mulita é uma importante matéria-prima utilizada na fabricação de refratário para cerâmicas estruturais, devido as propriedades físicas e mecânicas a altas temperaturas como alto ponto de fusão, baixa expansão, resistência a fratura e ao choque térmico, alta resistência a fluência e baixa constante dielétrica. A monoporosa possui uma alta resistência o que confere excelentes propriedades mecânicas e químicas, sendo muito utilizado como massa de revestimento em pavimentos e revestimentos exteriores. O aumento na energia de fratura foi determinado comparando as de curvas de flexão em três pontos do sistema multicamadas com as de suas referências monolíticas. As fraturas foram caracterizadas por microscopia óptica e MEV, para análise da microestrutura realizou-se difração de raios X. As amostras multicamadas desenvolvidas foram avaliadas tomando como referência os materiais empregados na constituição de cada camada, em relação a estas referencias foram conseguidas deformações médias de até 2,58 vezes maiores e energias de fratura de até 7 vezes maiores.

Palavras chave: laminados, deformação, energia de fratura.

ABSTRACT

Many of the compounds multilayers are manufactured from advanced ceramic compositions, which seeks higher mechanical performance, the manufacture of these compositions based materials, ceramic structural has been little studied. Aiming to increase the fracture energy in ceramics traditional was investigated in this study the mechanical behavior of a multilayer system formed by stacking mullite and monoporosa. The mullite is an important raw material used in the manufacture of refractory ceramic for structural, because the physical and mechanical properties at high temperatures as high melting point, low expansion, fracture toughness and thermal shock that, high resistance fluency and low dielectric constant. The monoporosa has a high resistance which gives excellent mechanical and chemical properties and is widely used as coating mass on floors and re-investments outer. The increase in fracture energy was determined by comparing the curves of three point bending of the multilayer system with its monolithic references. The fractures were characterized by optical microscopy and MEV for microstructure analysis was carried out X-ray diffraction. Samples developed were evaluated multilayer reference to the materials employed in the formation of each layer in relation to these reference strains were obtained averages to 2.58 times larger and fracture energies of up to 7 times larger.

Keywords: laminates, fracture energy, monoporosa, mullite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Concha marinha.....	10
Figura 3.1 – Amplificação da tensão de tração na ponta de um defeito.....	12
Figura 3.4.1 – Variações dimensionais em função da elevação de temperatura para alguns materiais cerâmicos.....	15
Figura 3.4.2 – Efeito de compressão nas camadas com menor coeficiente de expansão(y); Camadas x com maior retração e camadas y com menor retração.....	16
Figura 3.4.3 – Neste exemplo é possível observar de deflexão na propagação da trinca na camada mais clara, sob efeito de compressão.....	17
Figura 3.5.1 – As camadas sob efeito de compressão estão representadas pela cor mais escura. (a) A trinca é estabilizada pela propagação na região da interface; (b) delaminação em virtude da baixa interação entre as camadas.....	17
Figura 3.5.2 – Camada de cor clara em efeito de tração e a camada de cor escura em efeito de compressão. (a) Deflexão da trinca; (b) bifurcação da trinca;e (c) retenção da trinca na camada compressiva.....	18
Figura 3.5.3 – Trincas naturais na (a) camada compressiva e na (b) interface da camada tracionada. As setas representam a contração térmica predominante.....	18
Figura 3.5.4 – Bifurcação de uma trinca interna ao atingir uma trinca natural na camada compressiva.....	19
Figura 3.7 – Colagem de fita.....	20
Figura 3.7.1 – Tenacidade determinada pela área da curva de flexão.....	23
Figura 5.1.1 – Difratoograma da massa de revestimento monoporosa.....	29
Figura 5.1.2 – Difratoograma da mulita.....	30
Figura 5.3.1– Ensaio de flexão sendo realizado num sistema multicamada de monoporosa com camadas compressivas de mulita.....	31
Figura 5.3.2 – Curva de flexão para referência monolítica e laminado A.....	32
Figura 5.3.3 – Curva de flexão para referência monolítica e laminado B.....	32
Figura 5.3.4 – Região fraturada.....	34

Figura 5.4.1 – Defeitos do tipo fissura nas camadas de mulita (mais escuras) para os laminados a) A e b)B.....	35
Figura 5.4.2 – Microscopia eletrônica de varredura a) e b), revelando propagação irregular da trinca indicando a deflexão de trincas como um mecanismo de aumento na energia de fratura para o laminado A.....	35
Figura 5.4.3 - Microscopia eletrônica de varredura para a) e b) revelando propagação irregular da trinca indicando a deflexão de trincas como um mecanismo de aumento na deformação de fratura para o laminado B.....	36
Figura 5.4.4 – MEV revelando a espessura das camadas do laminado A. a) camada de monoporosa, b) camada compressiva de mulita.....	37
Figura 5.4.5 – MEV revelando a espessura das camadas do laminado B. a) camada de monoporosa. b) camada compressiva de mulita.....	37
Figura 5.4.6 – Microscopia eletrônica de varredura revelando a porosidade e a interface entre as camadas, as camadas mais claras correspondem a monoporosa e mais escuras a mulita.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVO.....	11
2.1	OBJETIVO GERAL.....	11
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1	PROCESSO DE FRATURA E FORMAÇÃO DE TRINCAS.....	12
3.2	PROPAGAÇÃO DA TRINCA.....	13
3.3	FRATURA FRÁGIL.....	14
3.4	SISTEMAS MULTICAMADAS.....	14
3.5	INTERFACE ENTRE CAMADAS.....	17
3.6	MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE MULTICAMADAS.....	19
3.6.1	Colagem de fita.....	19
3.6.2	Colagem de barbotina.....	20
3.6.3	Colagem por centrifugação.....	20
3.6.4	Deposição eletroforética.....	21
3.6.5	Prensagem Uniaxial.....	21
	Tabela 5.3.4 - Valores médios das propriedades mecânicas das amostras.....	22
3.7	DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE PELA CURVA DE FLEXÃO.....	22
3.8	ENSAIO DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO POR TRÊS PONTAS.....	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4.1	SELEÇÃO DE MATERIAIS.....	24
4.2	MÉTODO.....	24
4.3	CÁLCULO DAS MASSAS.....	25
4.4	ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	25
4.5	DENSIDADE APARENTE.....	26
4.6	POROSIDADE APARENTE.....	26
4.7	RETENÇÃO LINEAR.....	27
4.8	PERDA AO FOGO.....	27
4.9	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	27
4.10	ENSAIO DE FLEXÃO.....	27

4.11	DIFRAÇÃO DE RAIO X.....	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
5.1	DIFRAÇÃO DE RAIO X.....	29
5.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS.....	30
5.3	ENSAIO DE FLEXÃO.....	31
5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	34
6	CONCLUSÃO.....	39
7	TRABALHOS FUTUROS.....	39
8	REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

A engenharia emprega materiais cerâmicos em diversos sistemas, estes por sua vez, são materiais muito mais estáveis que os metais em desempenhos químicos e térmicos e de resistência ao atrito. Entretanto, a fragilidade e a falha por deformação delimitaram o uso de cerâmicas em várias aplicações estruturais [1].

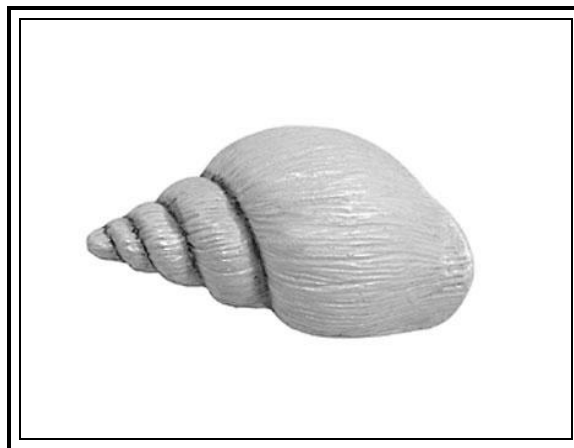
Já foram feitos estudos sobre o aumento da energia que o material cerâmico pode absorver antes de fraturar ou a criação de uma fratura não frágil já foram feitos com o objetivo de melhorar o comportamento mecânico das cerâmicas.

Com os avanços tecnológicos pode-se produzir estruturas em que a combinação de diferentes camadas de materiais, leva a um material com comportamento mecânico superior ao dos materiais de sua constituição, o que aumenta a confiabilidade [2].

A fabricação de cerâmicas multicamadas é uma alternativa viável e que possibilita o aumento da tenacidade à fratura melhorando o comportamento de materiais cerâmicos em relação a propagação de trincas e falhas.

Um exemplo observado na natureza são as conchas marinhas. Elas são formadas por várias camadas finas depositadas sequencialmente (Figura 1.1), resultando em um aumento na resistência mecânica [3].

Figura 1.1 - Concha marinha



O desenvolvimento de estruturas laminadas baseia-se no pressuposto de que é possível criar um material com propriedades melhores devido a tensões de tração e compressão que ocorrem entre as camadas, determinadas pela diferença entre os coeficientes de expansão das camadas que compõe o laminado [4].

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Muitos dos compostos multicamadas são fabricados a partir de composições de cerâmica avançada, em que se busca elevado desempenho mecânico. A fabricação destes materiais a base de composições de cerâmicas estruturais tem sido muito pouco estudado. Este estudo torna-se particularmente importante na fabricação de peças de grandes dimensões, em que um aumento da tenacidade da cerâmica é requerido. Um exemplo de aplicação seria na fabricação de fachadas ventiladas, em que peças de grandes dimensões são requeridas. Portanto, o presente estudo visa contribuir na área, em particular na fabricação de compostos de revestimentos multicamadas.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Obter aumento da tenacidade para um sistema multicamadas formado por camadas de massa de revestimento monoporoso e camadas compressivas de mulita em comparação às suas referências monolíticas.

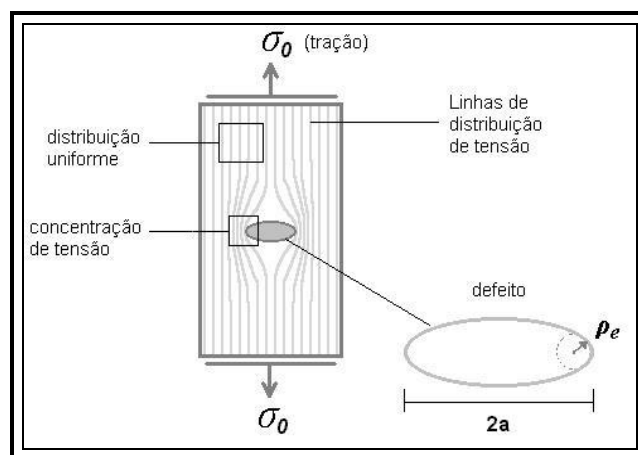
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - PROCESSO DE FRATURA E FORMAÇÃO DE TRINCAS

O processo de fratura em um material consiste basicamente em duas etapas: a formação e a propagação de trincas. Esses fenômenos ocorrem como resposta à aplicação de uma carga externa e são característicos de cada material.

Geralmente a *formação de uma trinca* está associada à presença de *defeitos* relativamente pequenos presentes na superfície ou no interior do material. Os defeitos atuam como concentradores de tensão amplificando a magnitude da tensão de tração aplicada.

Figura 3.1 – Amplificação da tensão de tração na ponta de um defeito



Fonte: BURNAT, F. STOCO, T

Nos materiais cerâmicos, os defeitos podem variar desde microtrincas, arestas de grãos até poros, sendo produzidos naturalmente ou incorporados durante o processo de fabricação [5].

Uma vez que os materiais cerâmicos apresentam uma grande variedade de defeitos e estes são praticamente impossíveis de serem controlados, a confiabilidade das cerâmicas é função dessa distribuição de defeitos. Normalmente os materiais cerâmicos apresentam baixa confiabilidade, sendo necessária à utilização de métodos estatísticos para contornar esse problema [3].

3.2 PROPAGAÇÃO DA TRINCA

A concentração de tensão na extremidade de um defeito pode induzir a propagação de uma trinca, levando a fratura do material. Para que uma trinca inicie sua propagação, é necessário que uma tensão máxima (σ_m) seja atingida em sua extremidade, para trincas relativamente longas, essa tensão poderá ser calculada utilizando a equação 3.2.1 [5]:

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_e} \right)^{1/2} \quad (3.2.1)$$

- onde σ_0 corresponde a tensão de tração nominal aplicada, ρ_e ao raio de curvatura da extremidade da trinca e a a metade do comprimento de uma trinca externa. (Figura 3.1).

Uma trinca será originada a partir de um defeito crítico, o principal presente no material. Com base nisso *Griffith* [2] propôs uma relação que possibilita determinar a máxima tensão (σ_f) 3.2.2, que um componente frágil pode suportar.

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi.a} \right)^{1/2} \quad (3.2.2)$$

$$\sigma_c = \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi.a} \right)^{1/2} \quad (3.2.3)$$

- onde E corresponde ao módulo de Young, γ_s a energia requerida para criar uma nova superfície (energia da superfície fraturada) e a a metade do comprimento de uma trinca interna. A equação 3.2.3 se aplica somente a materiais frágeis. Para utilizá-la em materiais dúcteis é necessário considerar a componente da energia associada à deformação plástica, γ_p , ao longo da extensão da trinca. Nesse caso γ_s é substituído por $\gamma_s + \gamma_p$. Assim:

Quando a tensão crítica é atingida, tem início à propagação da trinca no material, conduzindo-o a fratura.

3.3 FRATURA FRÁGIL

Em geral podem ocorrer dois tipos de fratura, a fratura dúctil e a fratura frágil. A fratura dúctil tem como característica a propagação estável da trinca, ou seja, sob aplicação de uma carga, o aumento na extensão da trinca prossegue relativamente lento devido à extensa deformação plástica ocorrida em sua vizinhança, a falha é então caracterizada por alta absorção de energia. Na fratura frágil, a propagação da trinca é instável, ao atingir determinado valor de tensão aplicada, a trinca irá se propagar espontaneamente e de forma extremamente rápida até a falha completa do material. Geralmente, há pouca ou nenhuma deformação plástica associada, e a energia absorvida antes da fratura é relativamente baixa, este tipo de fratura ocorre predominantemente em materiais cerâmicos [6].

Várias rotas têm sido exploradas para melhorar as propriedades mecânicas das cerâmicas, consistindo em aumentar o conhecimento macroscópico e microscópico para compreender o comportamento mecânico de materiais frágeis, e relacionadas à melhoria do processo de preparação destes materiais, outras se concentram no desenvolvimento de novos materiais e estruturas, com melhor tolerância a falhas mecânicas. Nesta rota se concentram os estudos em laminados de cerâmicas.

A laminação de diferentes camadas finas de cerâmica é um processo relativamente simples e barato, que tem mostrado resultados interessantes e pode ser considerada uma alternativa válida para os processos mais sofisticados [7].

3.4 SISTEMAS MULTICAMADAS

Uma cerâmica multicamada é um sistema onde camadas de materiais de diferentes propriedades são empilhadas alternadamente de maneira a reunir propriedades que permitem que o laminado quando sujeito a tensões de deformação tenha melhores propriedades mecânicas se comparados aos materiais que foram

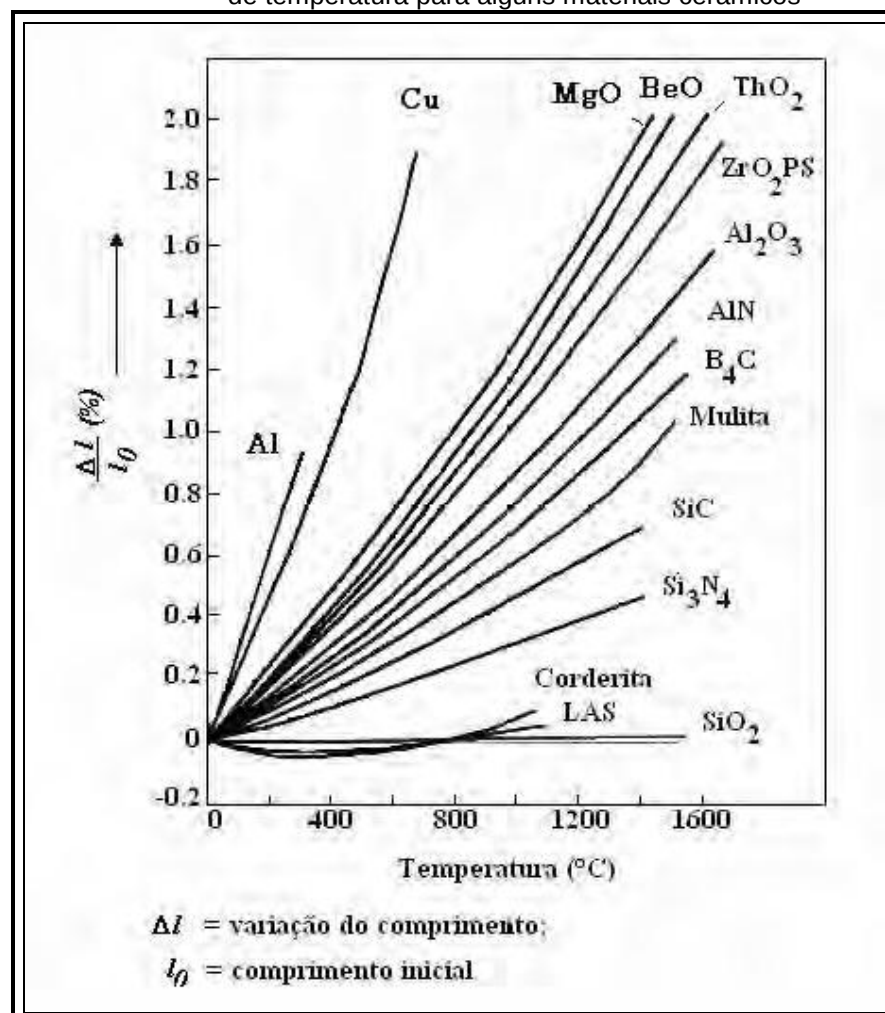
empregados em sua constituição [8].

O melhoramento das propriedades mecânicas num sistema multicamadas pode ser obtido pelo desenvolvimento de tensões residuais compressivas. Este objetivo é alcançado explorando diferenças na composição, microestrutura, espessura das camadas e ordem de empilhamento [6].

A diferença do coeficiente de expansão térmica, entre camadas de materiais diferentes gera tensões residuais térmicas durante o resfriamento após a sinterização. O material que apresentar menor retração será forçado a contrair, ficando sob esforço de compressão, consequentemente o outro material ficará sob esforço de tração.

A Figura 3.4.1 exibe a expansão térmica de alguns materiais cerâmicos usados na engenharia em função do aumento gradual de temperatura.

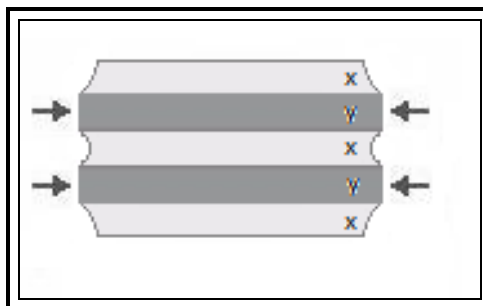
Figura 3.4.1 – Variações dimensionais em função da elevação de temperatura para alguns materiais cerâmicos



Fonte: BARSOUM, M. W. Fundamentals of Ceramics

A Figura 3.4.2 mostra as camadas que possuem menor coeficiente de expansão sobre efeito de compressão.

Figura 3.4.2 – Efeito de compressão nas camadas com menor coeficiente de expansão(y); Camadas x com maior retração e camadas y com menor retração



Fonte: O autor

A tensão residual produzida em laminados cerâmicos pode ocorrer por diferentes fatores como crescimento intrínseco equiaxial de grãos, variações de densidade ou volume, densificação, oxidação da superfície, fatores extrínsecos como deformações térmicas, deformações termoplásticas desenvolvidas durante o resfriamento ou por forças externas e momentâneas.

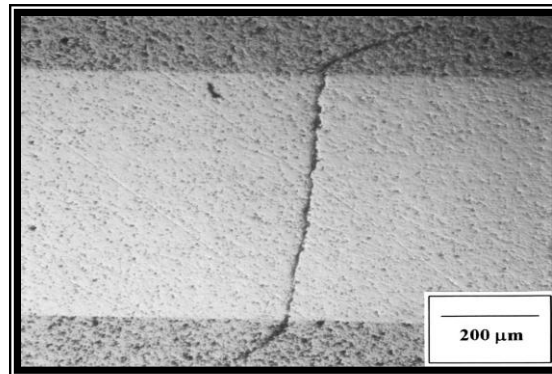
A mais comum está associado a diferentes coeficientes de expansão térmica entre camadas adjacentes [8]. Normalmente se utiliza uma espessura menor para a camada compressiva. Assim, o esforço de compressão fica concentrado numa camada fina e o de tração fica bem distribuído ao longo de uma camada espessa, minimizando seu efeito negativo [10].

Os materiais cerâmicos são geralmente fracos em condições de tração direta. Quando submetidos a este tipo de esforço, as trincas microscópicas existentes nos materiais tendem a se propagar e se orientar perpendicularmente ao eixo de tração [11]. A formação de tensões residuais compressivas nas camadas de menor coeficiente de expansão cria uma “barreira” contra a propagação da trinca, retendo ou aumentam o caminho da mesma proporcionando assim uma maior estabilidade do material.

A (Figura 3.4.3) mostra um sistema multicamada onde as camadas de cor clara estão sob efeito de compressão e as camadas de cor escura estão sob efeito de tração, é possível observar a trinca sendo desviada nas camadas sobre efeito de compressão. Dependendo da intensidade da tensão residual que se deseja, podem

ser utilizadas diferentes combinações para as espessuras das camadas, dependendo da intensidade da tensão residual que se deseja produzir [10].

Figura 3.4.3 – Neste exemplo é possível observar de deflexão na propagação da trinca na camada mais clara, sob efeito de compressão [7]

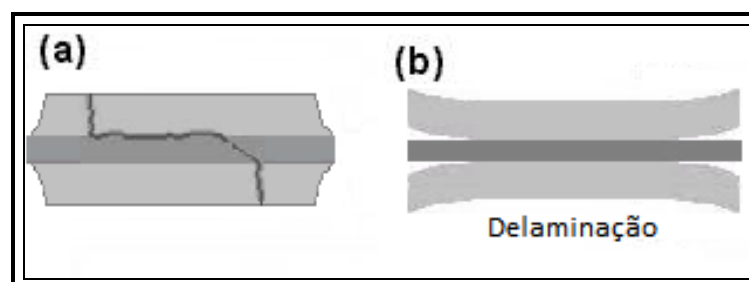


Fonte: PORTU, G. -Laminated ceramic structures from oxide systems.

3.5 INTERFACE ENTRE CAMADAS

Dependendo da compatibilidade entre os materiais é possível obter laminados com interfaces fracas e interfaces fortes. Para multicamadas de interface fraca, o mecanismo responsável pelo aumento na resistência à fratura está baseado na capacidade das camadas compressivas conduzirem as trincas, preferencialmente, ao longo da interface, entretanto, para esse tipo de interação pode ocorrer um fenômeno conhecido por “delaminação”, ou abertura das camadas figura 3.5.1. [12].

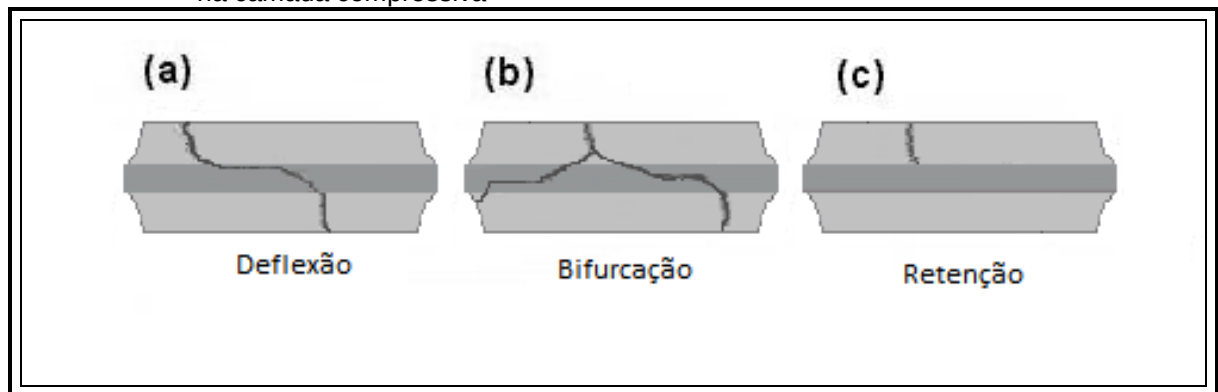
Figura 3.5.1 – As camadas sob efeito de compressão estão representadas pela cor mais escura. (a) A trinca é estabilizada pela propagação na região da interface; (b) delaminação em virtude da baixa interação entre as camadas



Fonte: O autor

Para cerâmicas multicamadas com interfaces fortes, as tensões residuais desenvolvidas são significativamente maiores que as produzidas nos sistemas com interface fraca, nesse caso o aumento na resistência a fratura é obtida pela deflexão da trinca, bifurcação ou pela retenção da mesma quando ela se propaga em direção à camada compressiva, como mostra a figura 3.5.2 [12].

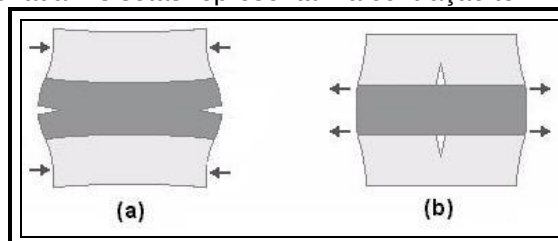
Figura 3.5.2 - Camada de cor clara em efeito de tração e a camada de cor escura em efeito de compressão. (a) Deflexão da trinca; (b) bifurcação da trinca; e (c) retenção da trinca na camada compressiva



Fonte: O autor

Para sistemas multicamadas formados por interfaces fortes, como as tensões residuais desenvolvidas são consideravelmente elevadas, é comum a formação de trincas naturais ao longo das camadas logo após a queima. Elas podem ser originadas tanto no centro da superfície externa da camada compressiva como próxima ao centro na interface da camada tracionada, figura 3.5.3 [12].

Figura 3.5.3 – Trincas naturais na (a) camada compressiva e na (b) interface da camada tracionada. As setas representam a contração térmica predominante

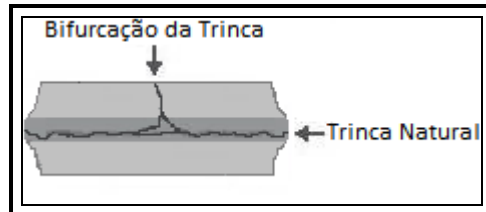


Fonte: O autor

A formação de trincas nas camadas tracionadas pode degradar a resistência mecânica do sistema. Por outro lado, a presença de trincas naturais nas camadas compressivas pode ser benéfica na dissipação de energia durante a propagação de

uma trinca, uma vez que ela favorece a bifurcação de trincas internas, figura 3.5.4, [13].

Figura 3.5.4 – Bifurcação de uma trinca interna ao atingir uma trinca natural na camada compressiva



Fonte: O autor

Laminados formados por interfaces fortes podem ser desenvolvidos tanto com camadas superficiais sob tração quanto com camadas superficiais sob compressão. Nos dois casos obtêm-se aumento na confiabilidade e na energia de fratura do material cerâmico. Entretanto, quando se utiliza uma camada externa sob tração, há redução na resistência mecânica do material em comparação a suas referências monolíticas [8].

3.6 MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE MULTICAMADAS

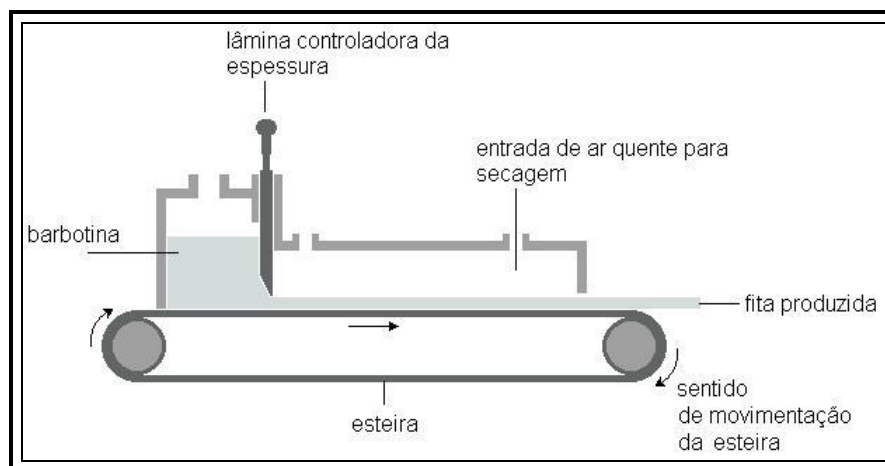
O desenvolvimento de materiais em camadas é talvez o método mais promissor de controle de trincas e fratura frágil [14]. Os métodos convencionais utilizados na fabricação de cerâmicas multicamadas são: colagem de fita (“tape-casting”), colagem por centrifugação (“centrifugal casting”), colagem de barbotina (“slip casting”), deposição eletroforética (“electrophoretic deposition”) e prensagem uniaxial.

3.6.1 Colagem de fita

Inicialmente são preparadas suspensões dos dois materiais a serem usados no sistema laminado. Uma das suspensões é introduzida no compartimento para colagem. Quando o movimento na esteira é acionado, uma fina camada do material fica depositada sobre a mesma. Sua espessura é controlada por uma lâmina

acoplada a um micrômetro e depende da velocidade da esteira. Ao ser movimentada pela esteira, a fita passa por uma câmara de ar quente onde é realizada a secagem do material. Após terem sido fabricadas fitas dos dois componentes, estas são cortadas em pequenas placas nas dimensões desejadas para a amostra. Sobrepondo alternadamente as placas obtêm-se o sistema multicamadas [15].

Figura 3.7 – colagem de fita



Fonte: BURNAT, F. STOCO, T

3.6.2 Colagem de barbotina

Esta é uma técnica que consiste na preparação de uma suspensão com as matérias-primas dispersas em um líquido adequado, geralmente água, com um teor de sólidos relativamente elevado, a qual é vertida em um molde de gesso, poroso.

A água é drenada para o interior do molde por capilaridade, arrastando consigo as partículas cerâmicas nela dispersa, que se depositam sobre a parede do molde. Quando essa parede atinge a espessura desejada, o excesso de suspensão é removido e o material consolidado é submetido à secagem, durante a qual há retração do corpo colado, sendo possível tirá-lo do molde facilmente [16].

3.6.3 Colagem por centrifugação

Consiste em produzir moldes que giram, a idéia consiste em fazer com que através da força centrífuga a barbotina tome a circular forma do molde e solidifique,

a taxa de derramamento de material depende do material usado, da forma e do tamanho do molde [17].

3.6.4 Deposição Eletroforética

Uma suspensão coloidal de partículas migra sob a influência de um campo elétrico e é depositada em um eletrodo, esta técnica pode ser usada em processos onde as partículas da suspensão possam ser portadoras de carga, isto inclui materiais poliméricos, pigmentos, tintas, cerâmicas e metais [18].

3.6.5 Prensagem uniaxial

Na prensagem uniaxial o pó é compactado em um molde metálico por meio de uma pressão aplicada em uma única direção. É um método fácil, barato, que permite alta produtividade, embora esteja restrito a formas relativamente simples e apresente distribuição não uniforme na compactação [5].

A escolha do método para a fabricação de multicamadas depende de várias características como: espessura esperada das camadas, tipo de material utilizado, aplicação desejada etc. A tabela 3.6.6 relaciona os métodos com exemplos de estruturas estudadas.

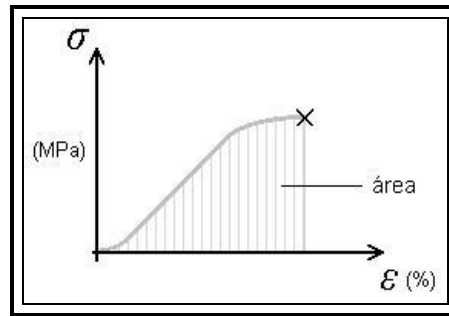
Tabela 5.3.4 - Valores médios das propriedades mecânicas das amostras

Método	Composição das Camadas
Colagem de fita	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{TiO}_5$
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{LaPO}_4$
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$
	Mulita / SiC
	$\text{MoSi}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
	$\text{YPO}_4/\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
	$\text{B}_4\text{C}/\text{SiC}$
Colagem de barbotina	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{LaPO}_4$
	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{TiO}_5$
	SiC / Grafite
Deposição eletroforética	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$
	SiC/TiC
	SiC / Grafite

3.7 DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE PELA CURVA DE FLEXÃO

Para situações estáticas (onde a taxa de deformação é pequena), a energia de fratura (tenacidade) pode ser determinada através da área da curva tensão-deformação, Figura 3.7.1 sua unidade corresponde à energia por volume de material (J/m^3 ou Pa) . Para determinar a área do gráfico é feita a integral do gráfico tensão x deformação.

Figura 3.7.1 – Tenacidade determinada pela área da curva de flexão



Fonte: CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais.

3.8 ENSAIO DE RESISTENCIA A FLEXÃO POR TRÊS PONTAS

Consiste na aplicação de uma carga crescente em determinado(s) ponto(s) de uma barra de secção circular ou retangular, apoiada em dois pontos. O ensaio é denominado de flexão por três pontos, quando a carga aplicada for localizada no centro da distância entre os apoios. Uma vez rompido o corpo de prova, a tensão de resistência à flexão é obtida pela equação 3.8.1.

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \right) \quad (3.8.1)$$

Sendo P o valor da carga aplicada pelo aparelho no material em estudo, L a distância entre os apoios, b a largura do corpo e h a espessura do corpo de prova.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Os materiais estudados foram selecionados de maneira a combinar diferentes propriedades dos materiais como resistência mecânica, porosidade, retração linear, absorção de água associadas a um baixo custo. Os materiais que apresentaram estas características e que obtiveram melhor desempenho na confecção das multicamadas nos ensaios a flexão foram a massa de revestimento monoporosa e a mulita.

A monoporosa foi adquirida através da Roca Insepa, a mulita utilizada foi extraída da moagem de tijolos refratários.

4.2 MÉTODO

Os métodos convencionais utilizados na fabricação de multicamadas são extremamente precisos, possibilitando a obtenção de camadas na ordem de poucos microns. Entretanto, são processos demorados e normalmente utilizam solventes orgânicos que, além da toxicidade, aumentam o custo do processo [22], inviabilizando a sua utilização em cerâmicas tradicionais.

Com o objetivo de desenvolver um processo mais barato, tornando viável a utilização em cerâmicas tradicionais, o método utilizado foi a prensagem uniaxial dos pós.

Os pós dos materiais foram processados em moinho de bolas com água deionizada e 0,2% de dispersante silicato de sódio, durante 24 horas. Após isso, foram levados a estufa para secagem. Posteriormente cada pó foi desaglomerado em almofariz de porcelana e granulado em peneira de malha 100. Depois deste processo, foi misturado a cada pó um plastificante (composto de álcool polivinílico e etileno glicol) numa proporção 5% em peso.

Para a melhor precisão dos resultados, cinco amostras de cada material foram sinterizadas a 1180°C. Para ambas, a taxa de aquecimento foi de 10°C/min e o patamar foi de uma hora. Foram medidas as massas necessárias para cada camada de forma a obter espessuras pré-definidas.

4.3 CÁLCULOS DAS CAMADAS

As medidas de espessura das camadas de monoporosa e mulita foram baseadas na quantidade de massa para cada material, as massas foram calculadas pela relação:

$$m = d.V \quad (4.3.1)$$

em que m é a massa de cada material, d é a densidade e V é o volume da camada desejada. Como o molde é retangular o volume foi estimado pela área da base vezes a espessura de cada camada através da relação:

$$m = d.A_b.e \quad (4.3.2)$$

sendo que A_b corresponde a área da base do molde e e a espessura da camada.

Foram feitos corpos de prova, com 4 camadas de 3 mm de monoporosa (Laminado A), intercaladas com 3 camadas internas de 0,5 mm de mulita, e corpos de prova com 4 camadas de 1,5 mm de monoporosa (Laminado B) intercaladas com 3 camadas internas de 0,5 mm de mulita. Para o laminado A foram usadas quantidades de massa de 4,80 g para monoporosa e 0,88 g de mulita, para o laminado B foram usadas 2,40 g de monoporosa e 0,88 g de mulita.

Os pós de monoporosa e mulita foram prensados em sequência num molde de dimensões 13 mm x 60 mm, numa pressão de 130MPa e deixados em estufa a 60°C por 24h e após secagem foi feita a sinterização a 1180°C/1 hora.

Após a sinterização, as principais características físicas foram determinadas: retração linear, absorção de água, densidade aparente, porosidade aparente, retração linear e perda ao fogo.

4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

Foi obtida calculando-se o ganho de massa que o corpo de prova sofreu ao ficar imerso em água, através da equação

$$AA = P_u - \frac{P_s}{p_s} \quad (4.4.1)$$

em que:

AA = absorção de água

Pu = Peso da amostra úmida

Ps = Peso da amostra seca

4.5 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente após a secagem foi determinada por imersão em água por 24h e peso da amostra imersa (Pi), pela relação:

$$D_{ap} = \frac{P_s}{P_u - P_i} \quad (4.5.1)$$

sendo:

Dap = densidade aparente

Ps = Peso seco da amostra seca

Pi = Peso imerso da amostra imersa

Pu= Peso da amostra úmida.

4.6 POROSIDADE APARENTE

A porosidade aparente foi determinada através da relação;

$$P_a = \left(\frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \right) \cdot 100 \quad (4.6.1)$$

Onde:

Pa = peso aparente

Pu = peso úmido

Pi = Peso imerso

Ps = Peso da amostra sinterizada seca

4.7 RETENÇÃO LINEAR

A retenção linear após sinterização do corpo foi determinada por:

$$\%L = \left(\frac{L_0 - L_i}{L_0} \right) \cdot 100 \quad (4.7.1)$$

em que

L_0 é o comprimento de saída do molde e

L_i corresponde ao comprimento após a sinterização do material

4.8 PERDA AO FOGO

A perda ao fogo do corpo foi determinada através da relação:

$$P_f = \left(\frac{P_i - P_f}{P_f} \right) \cdot 100 \quad (4.8.1)$$

Onde:

P_i – Peso do material antes da sinterização

P_f – Peso final do material após a sinterização

4.9 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

O comportamento das amostras multicamadas e das suas respectivas monolíticas, foi estudado através de ensaios mecânicos de flexão SHIMADZU AG-I 10KN e os resultados foram comparados pelas respectivas referências monolíticas. O sistema multicamada foi estudada através das caracterizações: porosidade, absorção de água, densidade aparente, obtidos pelo método de arquimedes, difração de Raios X SHIMADZU – XRD 6000 , propriedades mecânicas, microscopia eletrônica de varredura SHIMADZU SSX550.

4.10 ENSAIO DE FLEXÃO

Com o objetivo de avaliar o comportamento à fratura do sistema multicamada em relação às referências monolíticas de massa monoporosa e de

mulita, realizou-se ensaio de flexão em três pontos num equipamento SHIMADZU AG-I 10KN a uma velocidade de 0,1mm/min. A curva de flexão foi produzida através dos dados obtidos pelo equipamento.

4.11 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Por fim, para identificar as fases presentes realizou-se difração de raios X utilizando o equipamento SHIMADZU – XRD 6000. Para essa análise os materiais sinterizados foram desaglomerados em almofariz e peneirados em malha 325 (ABNT).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

As difrações de raios - x revelaram basicamente a presença de quartzo na monoporosa figura 5.1.1 A figura o difratograma da monoporosa. O difratograma da Mulita, figura 5.1.2 revela basicamente a kyanite que em temperaturas acima de 1100 ° C decompõe-se em mulita e sílica vítrea através da reação descrita em 5.1.3, essa transformação tem como resultado uma expansão. [23]

Figura 5.1.1 – Difratograma da massa de revestimento monoporosa

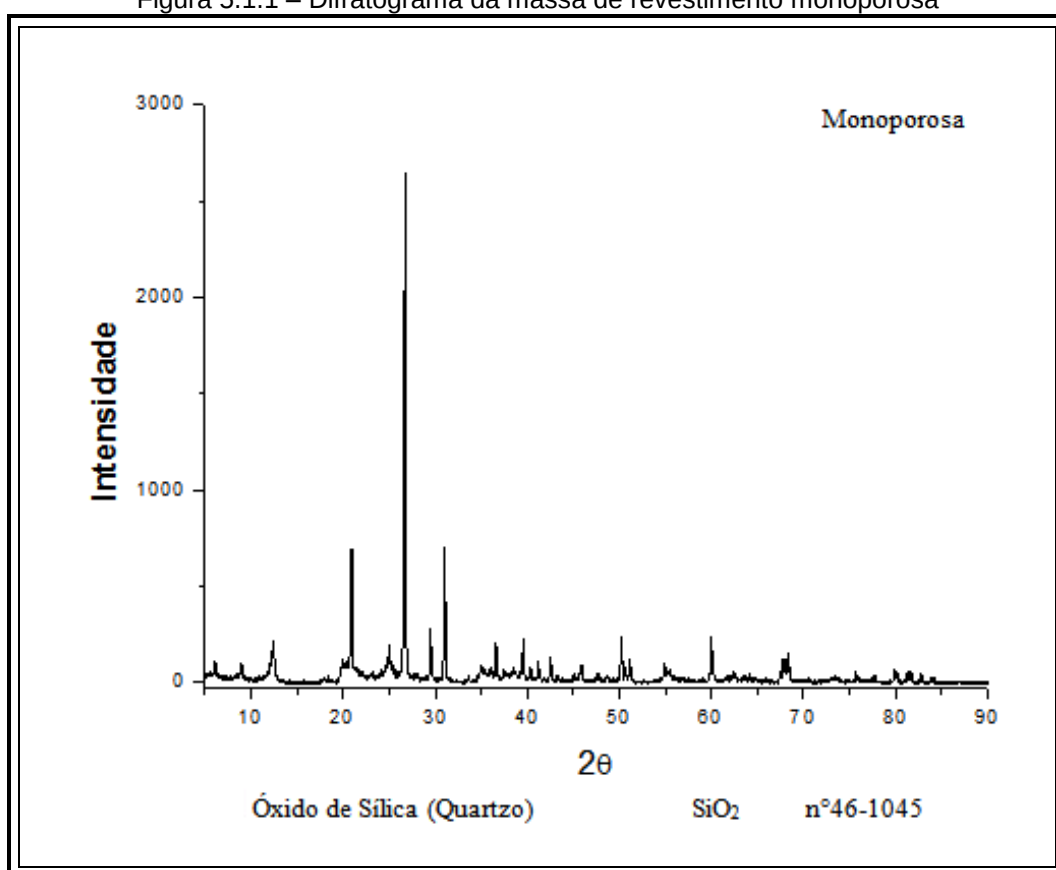
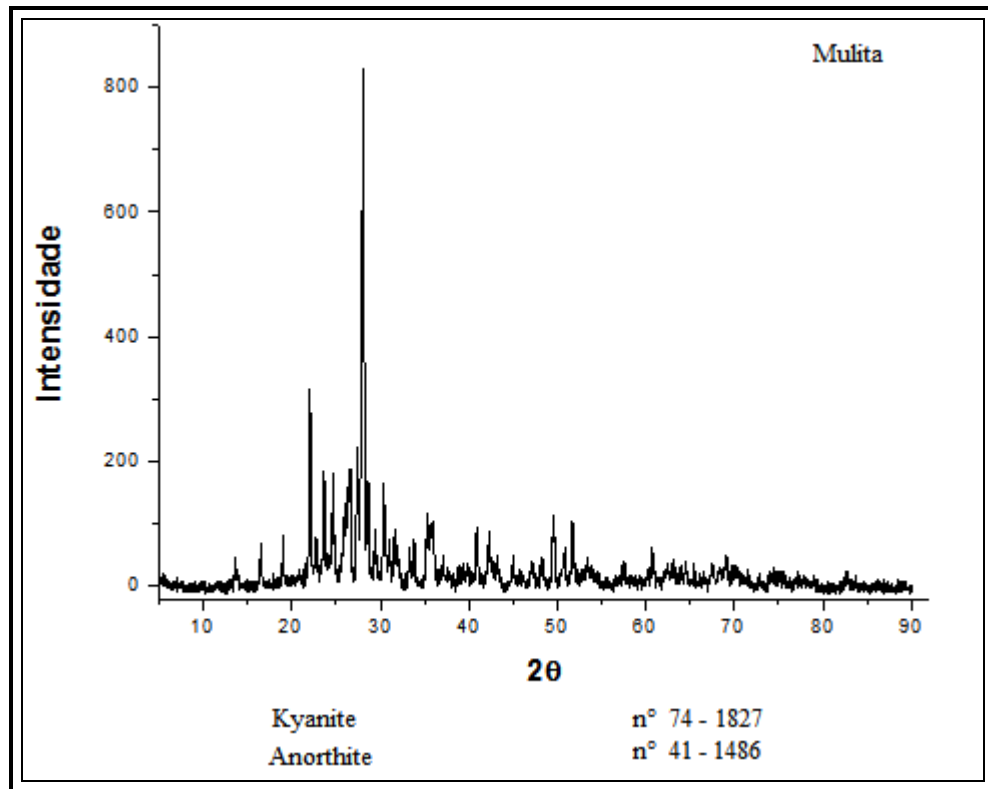
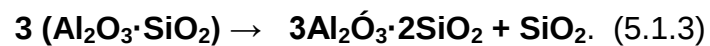


Figura 5.1.2 – Difratoograma da mulita



As temperaturas acima de 1100 ° C a Kyanite decompõe em mulita e sílica vítrea através da reacção 5.1.3 esta transformação resulta numa expansão [23].



5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS

A Tabela 5.2.1, apresenta valores de densidade, absorção de água, porosidade das amostras de monoporosa, mulita e dos laminados A e B, sendo os dados referentes a média de cinco amostras de cada material.

Tabela 5.2.1 – Caracterização física das amostras monolíticas e multicamadas

Material	Densidade (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Porosidade Aparente (%)	Retração Linear(%)	Perda ao fogo (%)
Monoporosa	1,73	15,80	27,00	0,41	17,41
Mulita	1,37	31,50	43,00	- 0,41	4,05
Laminado A	1,73	16,00	27,60	0,31	16,10
Laminado B	1,67	20,10	33,60	0,19	14,04

Fonte: O autor

Comparando os dados obtidos para a monoporosa com o laminado A, percebe-se uma pequena variação entre os valores de densidade, absorção de água e porosidade o que permite concluir que o laminado pode oferecer as mesmas características que conferem a este material sua aplicação em revestimentos.

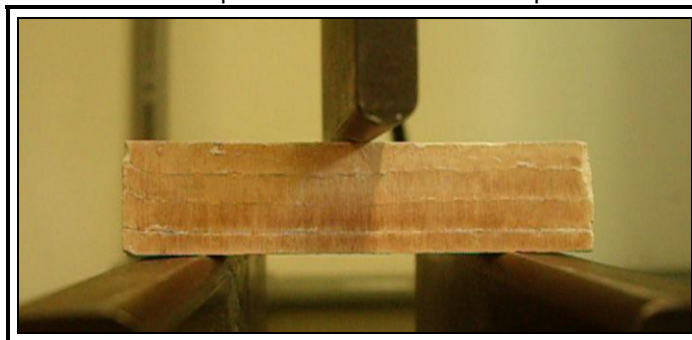
A retração linear após queima do monolítico de mulita foi negativa mostrando que a mulita não sofreu retração mas sim uma expansão linear, isto ocorreu devido a presença de kyanita, confirmando desta maneira que as camadas de mulita ficaram sob efeito de compressão.

E possível perceber que a redução da espessura da camada de monoporosa faz com que o laminado possua características intermediárias em relação as características dos seus constituintes, possibilitando uma maior campo de aplicação ao laminado.

5.3 ENSAIO DE FLEXÃO

O ensaio de flexão em três pontos foi realizado nas amostras monolíticas de cada material e nos laminados, Figura 5.3.1

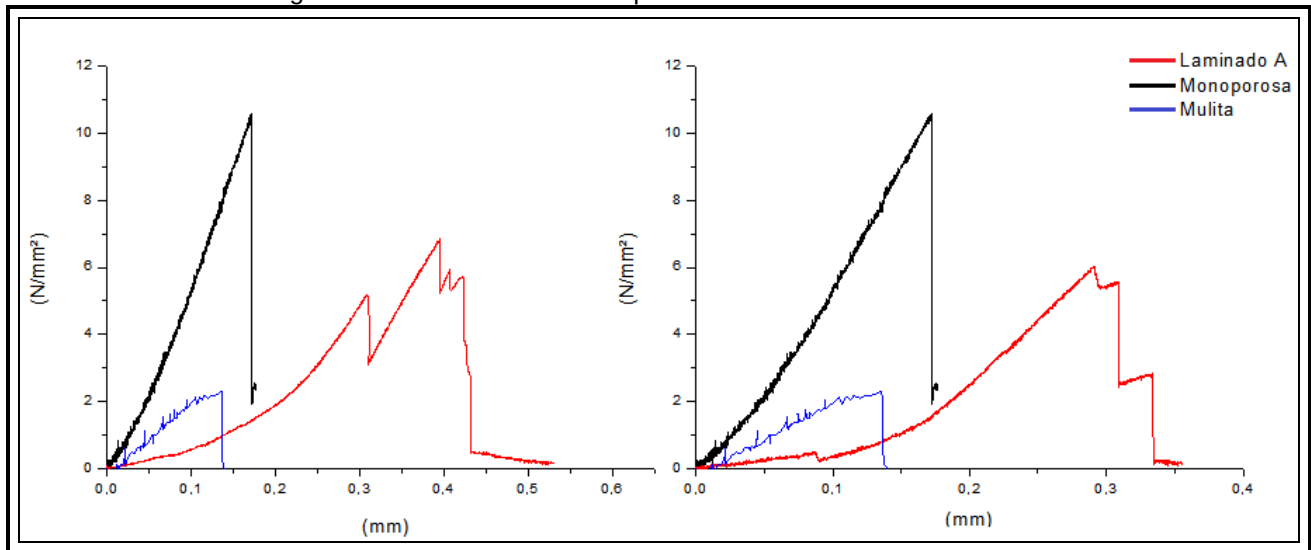
Figura 5.3.1 - Ensaio de flexão sendo realizado num sistema multicamada de monoporosa com camadas compressivas de mulita



Fonte: O autor

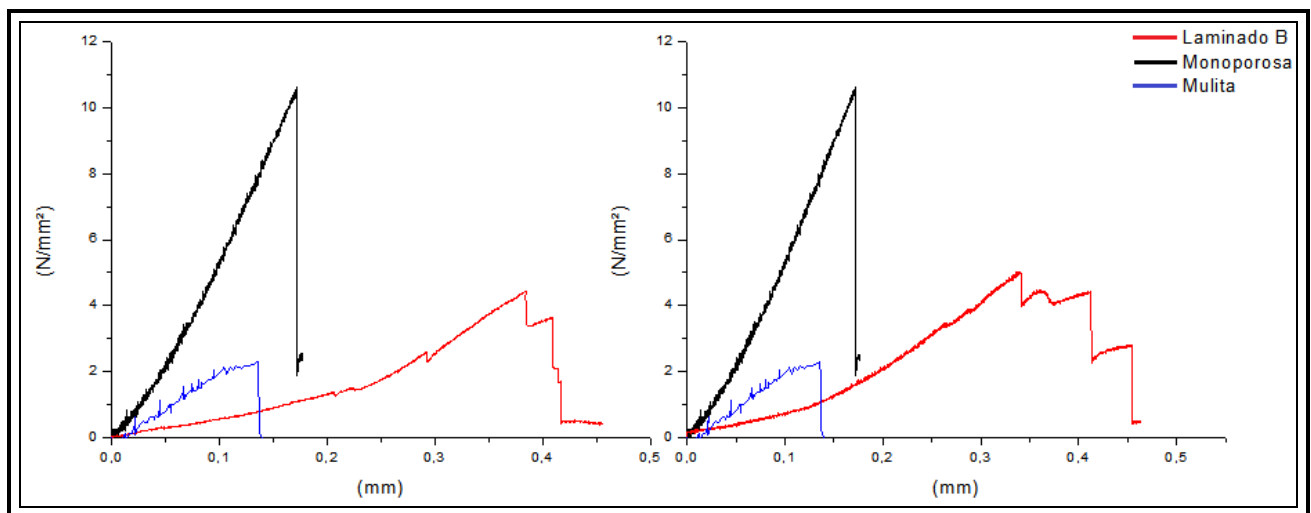
Na figura 5.3.2 e 5.3.3 são apresentadas curvas de flexão correspondentes à configuração estudada para as amostras.

Figura 5.3.2 – Curva de flexão para referência monolítica e laminado A



Fonte: O autor

Figura 5.3.3 – Curva de flexão para referência monolítica e laminado B



Fonte: O autor

Nas curvas referentes aos laminados pode ser observada a ocorrência de um efeito denominado “pop-in”, onde há uma queda repentina da carga seguida por um aumento progressivo após aumento da flexão [8]. Quando a trinca inicia sua propagação há uma queda repentina na carga devido à liberação de energia durante

a fratura. Entretanto, quando a trinca atinge uma camada compressiva, sua propagação é inibida e a carga torna a aumentar. No laminado A as tensões necessárias para que a trinca supere as camadas de monoporosa são maiores em relação ao laminado B, em contra partida a deformação e a energia de fratura do laminado A se apresentou inferior se comparada ao laminado B, desta maneira dependendo da aplicação é possível num sistema multicamadas dar preferência a deformação ou a tensão aplicada. Na Tabela 5.3.4 estão demonstrados os valores médios das propriedades mecânicas das amostras.

Tabela 5.3.4 - Valores médios das propriedades mecânicas das amostras

Material	Mulita	Monoporosa	Laminado B	Laminado A
Deformação (mm)	0,13	0,17	0,44	0,41
Força (N)	8,4	265	162,81	250,9
Tensão (N/mm ²)	2,88	10,6	4,45	6,85
Energia de Fratura (J/m ³)	217,09	954,09	996,7	1502,6

Fonte: O autor

Como é possível observar os laminados A e B obtiveram deformações médias respectivas de 2,41 e 2,58 vezes superior em relação a monoporosa, e 2,31 e 2,16 vezes superior em relação a mulita.

A energia de fratura média para o sistema multicamadas A e B foi 1,6 e 1,04 vezes superior a apresentada pela referência monolítica de monoporosa e cerca de 7 e 4,6 vezes a apresentada pela mulita, demonstrando o aumento da tenacidade para a configuração em camadas.

No entanto, os laminados apresentaram redução na resistência a flexão em comparação a monoporosa. Como observado na literatura [12], uma vez que se utilizaram camadas externas sob tração, a concentração de tensão nos defeitos superficiais aumentou, diminuindo a resistência mecânica do laminado.

A Figura 5.3.5 mostra de forma macroscópica a configuração descrita pela trinca na fratura dos laminados, a forma como ela se propaga depende da distribuição de defeitos nas camadas. É possível notar que a trajetória percorrida pela trinca em relação à amostra é sempre perpendicular nas camadas sob efeito de

tração e paralela nas camadas sob efeito de compressão. A condução da trinca nas camadas de mulita (sobre compressão) nos mostra que o sistema multicamadas mulita monoporosa apresenta interfaces fracas, uma vez que não foram observadas retenções de trinca para este sistema.

Figura 5.3.4 – Região fraturada



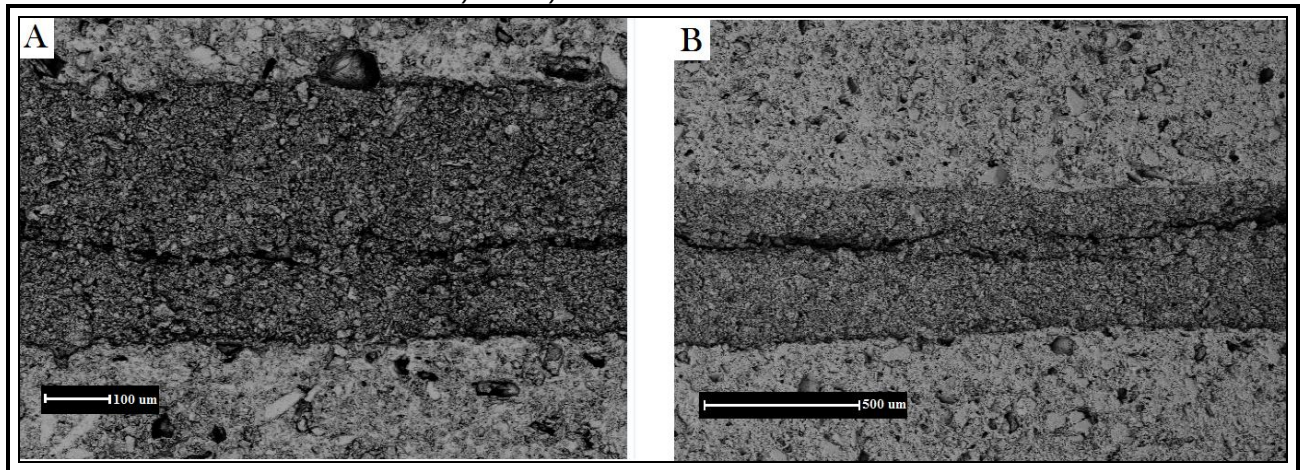
Fonte: O autor

5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para examinar mais detalhadamente o mecanismo de fratura que envolveu o sistema multicamada, foram realizadas análises através do microscópio eletrônico de varredura SHIMADZU SSX550. Para isso, as amostras foram polidas e metalizadas utilizando o equipamento SHIMADZU IC-50.

É possível observar na figura 5.4.1 para os laminados A e B (distante da aplicação da carga), que um possível mecanismo de aumento da energia de fratura é a formação de defeitos do tipo fissura, que estão relacionados a diferença de retração linear entre as camadas de monoporosa e mulita.

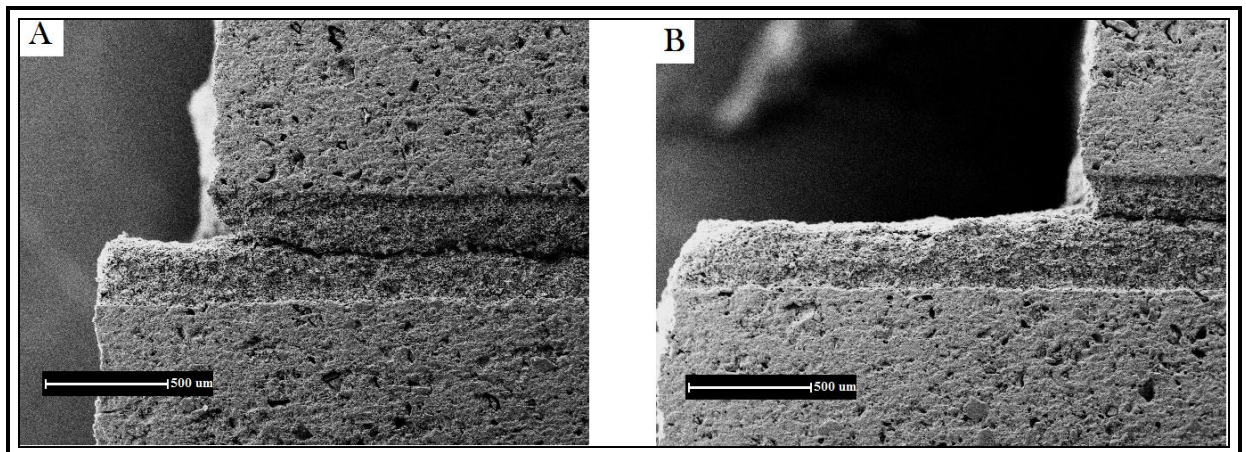
Figura 5.4.1 – Defeitos do tipo fissura nas camadas de mulita (mais escuras) para os laminados a) **A** e b) **B**



.Fonte: O autor

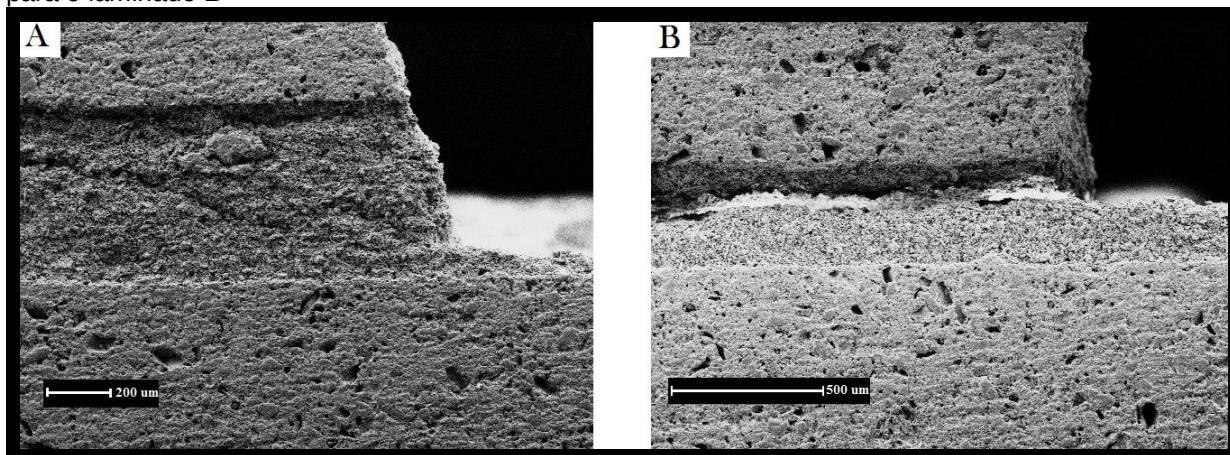
As figuras 5.4.2 a e b e 5.4.3 a e b apresentam, respectivamente, as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura da superfície fraturada dos laminados A e B. Nelas, podem-se observar a propagação irregular da trinca.

Figura 5.4.2 - Microscopia eletrônica de varredura a) e b), revelando propagação irregular da trinca indicando a deflexão de trincas como um mecanismo de aumento na energia de fratura para o laminado **A**



Fonte: O autor

Figura 5.4.3 - Microscopia eletrônica de varredura para a) e b) revelando propagação irregular da trinca indicando a deflexão de trincas como um mecanismo de aumento na deformação de fratura para o laminado **B**



Fonte: O autor

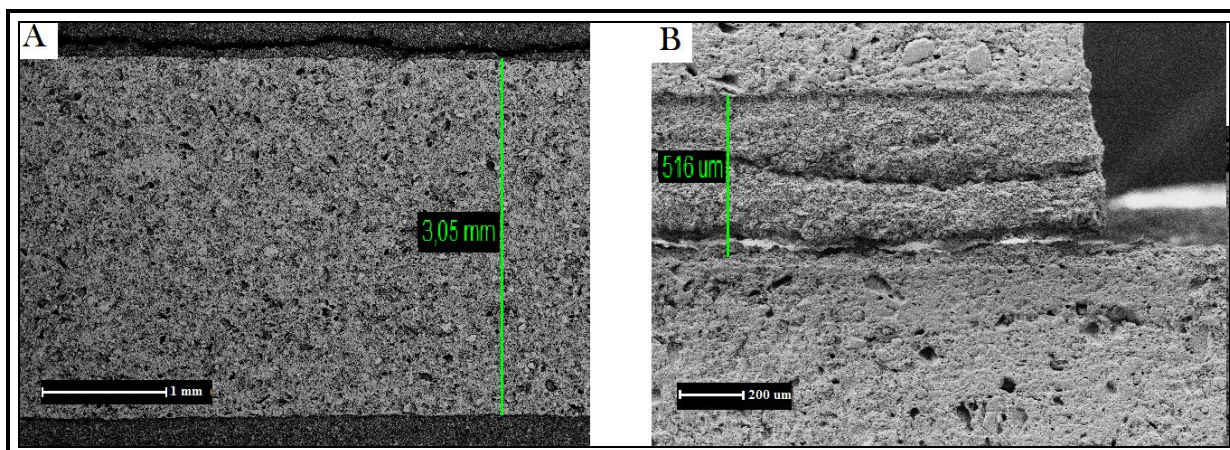
É possível observar para os laminados A e B que um possível mecanismo de aumento da deformação da fratura está relacionado a diferença de retração linear entre as camadas.

A 1180°C a monoporosa retrai e a mulita expande causando um esforço de compressão nas camadas de mulita, fazendo desta maneira com que o material apresente defeitos do tipo fissuras, os quais auxiliam a bifurcação das trincas durante a fratura do material, aumentando sua tenacidade, deixando de apresentar comportamento puramente frágil.

Uma vez iniciada, a fratura se propaga facilmente sob tensão, pois a concentração de tensões é aumentada conforme a fratura progride. Por outro lado, num material sob efeito de compressão, um defeito do tipo fissura não é autopropagante; as solicitações podem ser transferidas através deste defeito, sem que isso provoque um aumento de tensões [21]. Somente quando a camada compressiva é superada, a propagação torna a ocorrer paralelamente à carga aplicada, característica esta observada claramente nos laminados.

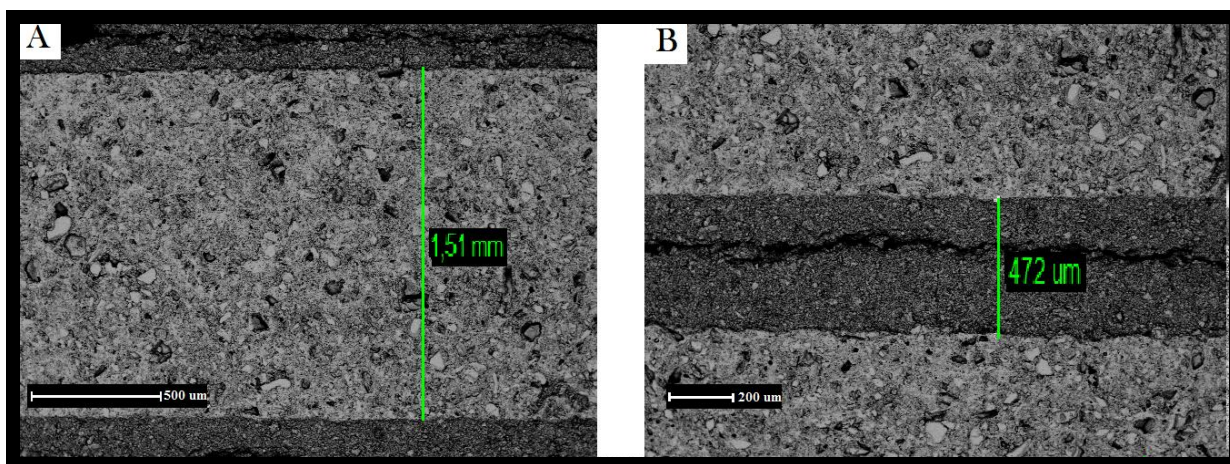
Na micrografia eletrônica de varredura representada na figura 5.4.4 e 5.4.5 são apresentadas as espessuras das camadas medidas utilizando recursos do próprio microscópio.

Figura 5.4.4 – MEV revelando a espessura das camadas do laminado **A**. a) camada de monoporosa, b) camada compressiva de mulita



Fonte: O autor

Figura 5.4.5 – MEV revelando a espessura das camadas do laminado **B**. a) camada de monoporosa, b) camada compressiva de mulita



Fonte: O autor

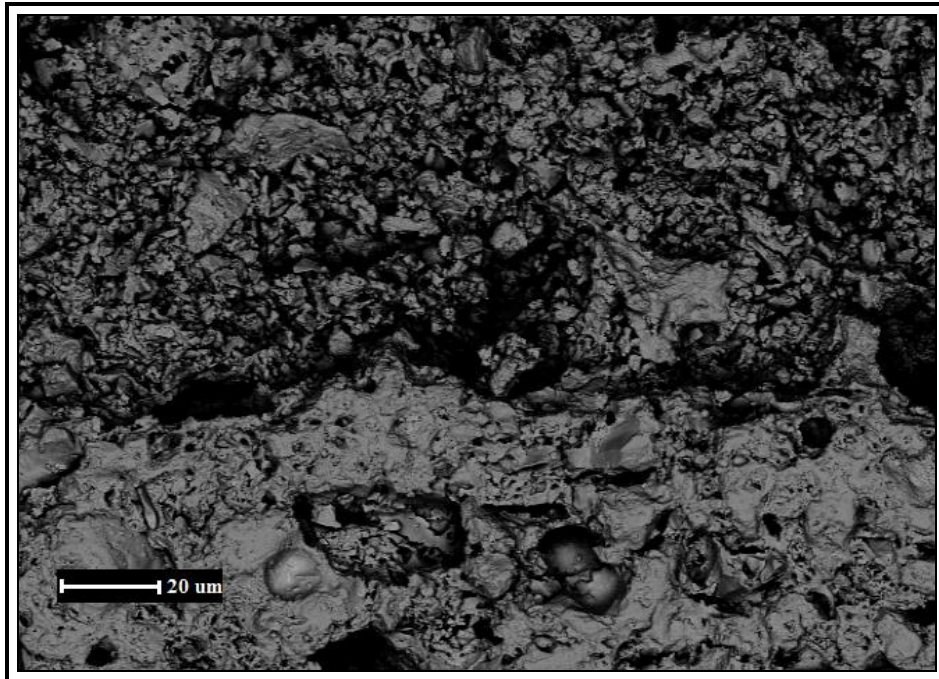
As espessuras das camadas foram obtidas empiricamente, para o laminado A a relação entre as camadas foi de 6 vezes, sendo que acima deste valor o material apresentava de laminação após a queima.

O laminado B teve relação entre as camadas de 3 vezes, sendo que abaixo deste valor a propagação da trinca nos ensaios de flexão era semelhante ao de uma fratura frágil.

A Figura 5.4.6 mostra a interface entre as camadas de mulita e monoporosa. Percebe-se que a interface é do tipo fraca devido a existência de vazios entre as camadas, um possível segundo mecanismo de aumento da energia de fatura é a

diferença entre a concentração de poros entre as camadas, a camada de mulita é mais porosa do que a monoporosa.

Figura 5.4.6 – Microscopia eletrônica de varredura revelando a porosidade e a interface entre as camadas, as camadas mais claras correspondem a monoporosa e mais escuras a mulita



Fonte: O autor

6 CONCLUSÃO

Com este trabalho pode-se concluir que é viável a possibilidade de obter melhores resultados em relação a energia de fratura do material em relação aos seus referenciais monolíticos para um sistema multicamadas com camadas compressivas de mulita e monoporosa uma vez que os valores obtidos foram satisfatórios.

Os laminados A e B obtiveram deformações médias respectivas de 2,41 e 2,58 vezes maior em relação a mulita, e 2,31 e 2,16 vezes em relação a monoporosa.

A energia de fratura média para o sistema multicamadas A e B foi 1,6 e 1,04 vezes maior que a apresentada pela referência de monoporosa e cerca de 7 e 4,6 vezes a apresentada pela mulita.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Aperfeiçoar o método de fabricação desenvolvido para cerâmicas multicamadas.
- Realizar infiltração com alumínio no sistema laminado e avaliar seu comportamento mecânico.
- Testar novas configurações para o sistema multicamadas, variando a razão entre camadas, o número de camadas, a espessura final do laminado e o tipo de tensão residual desenvolvido nas camadas superficiais.
- Testar outras cerâmicas tradicionais.
- Simulação computacional do comportamento da propagação da trinca em função do tipo de material usado no sistema multicamadas.

8 REFERÊNCIAS

- [1] FREITAS, M.; PIANARO, S. A.; NADAL, F. N. Preparação e caracterização de materiais compósitos SiC/Caulim/Al via “squeeze-casting”. **Cerâmica** **55**, 2009, p. 271-280.
- [2] MUSIKANT, S. What every engineer should know about CERAMICS. New York: Basel.Hong Kong: copyright © 1991 by Marcel Dekker, Inc. p. 1-9; 99-122.
- [3] DAVIDGE, R. W.; VAN DE VOORDE, M. H. **Designing with structural ceramics**: Commission of the European Communities. London and New York: Elsevier Applied Science, 1991, p. 6-9; 23-31; 50-72.
- [4] BUENO, S. Baudin, C. – Flaw tolerance Ceramic Laminates With Negligible Residual Stresses. **Key Engineering Materials** (Volume 333), Pages 17-26.
- [5] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002, p. 281- 282.
- [6] MUNZ, D. FETT, T. Ceramics. Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. p. 19, 25 – 37, 53, 57 – 61.
- [7] PORTU, G. MICELE, L. PEZZOTTI, G. -Laminated ceramic structures from oxide systems. April 2006, Composites art B: **Engineering**, Volume 37, Issue 6, 2006, and Pages 556-567.
- [8] BAUDÍN, R. et al. Processing optimisation and fracture behaviour of layered ceramic composites with highly compressive layers. **Composites Science and Technology**, Volume 67, Issue 9, July 2007, Pages 1930-1938.
- [9] BERMEJO, R. et al. Residual stresses, strength and toughness of laminates with different layer thickness ratios. **Acta Materialia**, jun 2006.
- [10] LANGE, F. F. Stresses and Crack Extension in Multi-Layered Ceramic Composites. In: **SIMAC**. Layered, functional gradient ceramics thermal barrier coatings: design, fabrication and applications. Minorca Island, 11-16 jun. 2006, cap. 1. p 11 – 27.

- [11] GARCIA, A., SPIM, J.A., SANTOS, C.A. **Ensaaios dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- [12] PASCUAL, J. et al. Fracture statistics of ceramic laminates strengthened by compressive residual stresses. **Journal of the European Ceramic Society**, Volume 28, Issue 8, 2008, Pages 1551-1556.
- [13] HBAIEF, K et. al. Crack bifurcation in laminar ceramics having large compressive stress. 2006. **International Journal of Solids and Structures**, Volume 44, Issue 10, 15 May 2007, Pages 3328-3343.
- [14] LUGOVY, M. SLYUNYAYEV, V. SUBBTIN, V. ORLOVSKAYA, N. and GOGOTSI, G. - Crack arrest in Si_3N_4 -based layered composites with residual stress, **Composites Science and Technology**, Volume 64, Issues 13-14, October 2004, Pages 1947-1957.
- [15] HOTZA, D. - aqueous tape casting of ceramic powders, **Materials Science and Engineering A**, Volume 202, Issues 1-2, 1 November 1995, Pages 206-217.
- [16] MATIAS, E. M., DELLÚ, M. Jr. ARAÚJO, H. S. KABAYAMA, H.W., ALBERS, A. P. F. e ORTEGA, F. S. - CARACTERIZAÇÃO DE COMPACTOS A VERDE DE Al_2O_3 OBTIDOS POR SLIP CASTING. - VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, paginas 2317 a 2320.
- [17] CUMBERLAND, J. **Centrifugal casting techniques**. British Foundryman, pg. 26 - 46, Jan 1963.
- [18] OMER, O. VAN DER BIEST and VANDEPERRE, Luc J. - **Electrophoretic deposition of materials**, Vol. 29, p. 327-352 (Volume publication date August 1999).
- [19] BARSOUM, M. W. **Fundamentals of Ceramics**. Philadelphia, U.S.A: McGraw Hill, 2003.
- [20] LINO, F. J. Cerâmicos: **Materiais em que vale a pena pensar**. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, fev. 2006. Disponível em: <in www.fe.up.pt/~falves>. Acesso em: jun 2012.
- [21] VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos Materiais Cerâmicos**. Tradução de

- Cid Silveira e Shiroyuki Oniki. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. p 3 – 6, 109 – 116.
- [22] GELFUSO, M. V.; PEREIRA JUNIOR, F. S.; THOMAZINI, D. **Influência do defloculante na deposição de alumina por eletroforese**. São Paulo, v. 49, n. 312, 2003.
- [23] SPEYER, ROBERT (1993). *Thermal Analysis of Materials*. **CRC Press**. p. 166. ISBN 0-8247-8963- 6. Disponível em: <http://books.google.com/?id=5vTPIN_Y_FMC&printsec=frontcover#PPA166,M1> Acesso em 20 abr 2012.
- [24] BURNAT, F.; STOCO, T. **Processamento de estruturas cerâmicas via processo de multicamadas: preparação e caracterização**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, Anais do XVII EAIC 06 – 09 de Agosto de 2008 – ISSN: