

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO DE FLEXÃO DE UM COMPÓSITO VITROCERÂMICO

Jader dos Santos Miranda, jader.smiranda@yahoo.com.br¹
Avelino Manuel da Silva Dias, avelino@ufsj.edu.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João Del-Rei, MG, CEP: 36307-352

Resumo: A engenharia de materiais vem sofrendo significativos avanços ao longo do tempo. Contudo, a necessidade de desenvolver materiais eficientes para as mais variadas aplicações estimula o estudo para aplicação de materiais compostos e de estruturas que sejam resistentes a condições adversas. Estudos recentes demonstram o potencial de algumas classes materiais, destaque especial para um material vitrocerâmico. Zerodur® é o nome comercial deste material que possui um baixo coeficiente de expansão térmica, sendo amplamente utilizado em equipamentos submetidos a grandes variações de temperatura, onde é necessário manter boa precisão de forma e geometria. Possui elevada dureza superficial mas apresenta um comportamento frágil, típico de materiais cerâmicos. No intuito de melhorar as características mecânicas do Zerodur® propõe-se a junção do mesmo com outros materiais (material compósito). Com auxílio do método dos elementos finitos torna-se possível analisar o comportamento global do compósito quando submetido a esforços externos. Neste trabalho utilizou-se o solver comercial de elementos finitos Marc™ na análise numérica computacional de uma estrutura composta de Zerodur® e aço. O objetivo principal deste trabalho é simular o comportamento deste compósito submetido ao ensaio de flexão e analisar os campos de tensão e de deformação na interface do mesmo.

Palavras-chave: Compósitos, Elementos Finitos, Simulação Numérica, Material.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia de materiais vem sofrendo significativos avanços ao longo do tempo. A necessidade de desenvolver materiais eficientes para as mais variadas aplicações tem estimulado a pesquisa por novos compostos que sejam resistentes a condições adversas. No entanto, a caracterização mecânica destes compostos tem sido difícil e onerosa, principalmente, por haver uma diferença das propriedades mecânicas das fases constituintes e do compósito resultante.

Por outro lado, recentes metodologias abordam o problema do dimensionamento mecânico e de falhas estruturais através do acoplamento de modelos numéricos com o regime macroscópico da estrutura. Nesta vertente, têm sido utilizados modelos discretos de elementos finitos (MEF) juntamente com os conceitos da mecânica dos meios contínuos para a avaliação de danos em uma estrutura. Estas abordagens vêm sendo desenvolvidas, tanto para a análise de falhas estruturais em materiais frágeis, quanto para materiais dúcteis. Porém, a correta incorporação de aspectos mecânicos e fenomenológicos inerentes ao projeto e aos mecanismos de falhas é um fator chave para o sucesso e a eficácia de tais metodologias preditivas aplicáveis à análise numérica da integridade mecânica de uma vasta classe de componentes estruturais e dos mais diversos materiais (Calister, 2002).

Em 1968, a Schott Glass Technologies Inc.®, desenvolveu o Zerodur®. Este novo material foi concebido para aplicações onde mudanças de temperatura são inevitáveis e que podem influenciar negativamente o tamanho crítico e as exatidões de dimensões.

Devido a sua grande qualidade e desempenho, este material tem sido utilizado em diversos ramos da indústria moderna como, em elementos óticos para equipamentos de litografia, peças mecânicas para equipamentos de metrologia de elevada precisão, espelhos para grandes telescópios astronômicos e padrões para a tecnologia da medida de precisão, Fig. (1). Entretanto, este vitrocerâmico apresenta um baixo módulo de elasticidade, conseqüentemente, baixa rigidez estrutural, e um comportamento frágil típico de materiais cerâmicos, limitando seu uso.



Figura 1. Padrões de medida fabricados com Zerodur®.

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de estudar numericamente um compósito tendo como fase matriz o Zerodur® e como fase dispersa pequenas barras longitudinais de aço carbono. Utilizou-se o aço como fase dispersa tendo em vista que ele possui um módulo de elasticidade aproximadamente duas vezes e meia maior do que o do Zerodur®. Espera-se que este compósito apresente um aumento na sua rigidez quando submetido ao ensaio de flexão. Esta rigidez mecânica do material foi avaliada através de valores numérico de seu deslocamento transversal. O campo de tensões na região da interface Zerodur®/aço também foi analisada. A simulação proposta neste trabalho utilizou modelos discretos através do Método dos Elementos Finitos (MEF), o qual é uma técnica numérica confiável para análise de tensões e deformações e na simulação de diferentes problemas de engenharia. Este método tem sido largamente utilizado para simular e resolver inúmeros problemas não lineares nas áreas de instabilidade estrutural, de sistemas dinâmicos e termo-fluidodinâmicos, sistemas eletromagnéticos e de conformação mecânica. Estas simulações numéricas foram executadas no solver comercial de elementos finitos MARC™ (2007).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Zerodur®

Zerodur® é o nome comercial de um material vitrocerâmico usinável de baixa expansão térmica, Fig. (2), e ele é um material cerâmico não poroso, isotrópico e muito utilizado em aplicações onde ocorrem variações de temperatura.

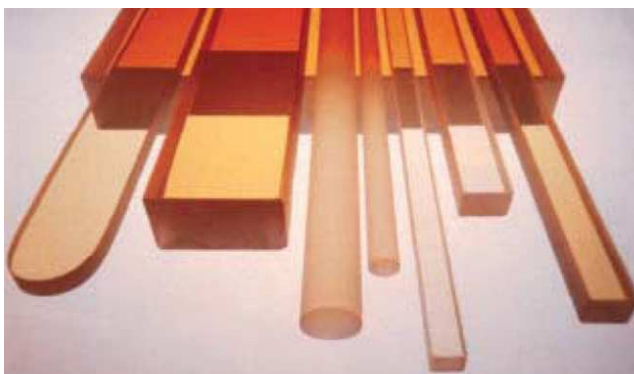


Figura 2. Zerodur®.

A produção do Zerodur® advém de métodos modernos da tecnologia de cristais e ópticos. Os cristais são fundidos, refinados, homogeneizados e finalmente conformados. Após o subsequente cozimento, diminui-se a pressão, para realização do tratamento do centro cristalino. Este processo é acompanhado de uma ceramização precisa, durante a qual os cristais são transformados em vitrocerâmicos através de uma cristalização de volume controlado (Hartmann *et al.*, 2008). Durante este tratamento formam-se núcleos dentro do vidro, e, ocorre o surgimento de cristais em altas temperaturas. O material resultante é transparente e claro, com as seguintes propriedades (Döhring *et al.*, 2005):

- Coeficiente de expansão térmica extremamente baixo.
- Boa homogeneidade.
- Qualidade interna elevada.
- Bom acabamento superficial.
- Grande estabilidade química.

Basicamente, este vitrocerâmico é formado por óxidos (Li_2O , SiO_2 , Al_2O_3), com densidade de $2,53 \text{ g/cm}^3$, condutividade térmica de $1,6 \text{ W/m.K}$ e coeficiente de expansão térmica menor $0,10 \times 10^{-6}/\text{K}$ (Mirkarimi *et al.*, 2000).

Ele também possui uma boa processabilidade, ou seja, é de fácil manuseio durante a sua fabricação apesar de apresentar uma faixa de temperatura de síntese que vai de 700 a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ (Berezhinsky *et al.*, 2004).

A principal característica do Zerodur® é a presença de uma fase amorfa que tem dilatação térmica positiva (expansão) e uma fase cristalina que apresenta uma expansão térmica negativa (contração), o que lhe proporciona um baixo índice de variação de tamanho quando submetido a grandes variações de temperatura. Esta característica é obtida pela nucleação bem definida e condições adequadas de cristalização, o que torna o Zerodur® um material com baixa expansão térmica. Em determinadas faixas de temperatura seu coeficiente de expansão térmica pode ser aproximadamente zero ou, até, ligeiramente negativo, dependendo do processo de ceramização utilizado (Schmitz *et al.*, 2002).

Quantitativamente é composto de 70 a 78% de fase cristalina, com alta solução de quartzo, que dá a sua superfície transparência e o torna mais robusto. Esta fase apresenta cerca de 11 nm de diâmetro, o que a torna muito dura, de difícil penetração e com baixa reflexão. Por outro lado, se a parte desta fase ainda receber uma matriz de sílica fundida é transmitido uma maior proteção (Soufli *et al.*, 2007).

Quando nos referimos à transparência do Zerodur® é indicado um grau de transparência para o mesmo, que é definido através da litografia ultravioleta. É uma técnica que analisa o quanto a fase amorfa interfere nessa transparência, sendo possível a partir desta análise aperfeiçoar a porcentagem das duas fases para estabelecer uma maior precisão do grau de pureza desejado (Mirkarimi *et al.*, 2001).

2.2. Compósitos

Um compósito estruturado pode ser definido como um sistema de materiais formado de duas ou mais fases numa escala macroscópica, cujo desempenho mecânico e propriedades são projetados para serem superiores as de seus constituintes atuando independentemente. Uma das fases é geralmente descontínua, mais forte e resistente, sendo denominada dispersa ou reforçador; enquanto que a fase menos resistente é contínua e denominada matriz. A fase dispersa pode ter a forma de fibras ou partículas e é responsável por suportar o carregamento aplicado (Daniel e Ishai, 1994). Estes materiais começaram a ser usados em larga escala a partir da primeira metade do século passado e atualmente são bastante empregados nas indústrias naval, aeroespacial, automobilística e eletrônica.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Ensaio de Flexão em Três Pontos

Para avaliação da resistência mecânica de materiais frágeis como, por exemplo, material cerâmico, é comumente utilizado o ensaio de flexão de três pontos. Neste ensaio, um corpo de prova prismático fica apoiado em dois apoios fixos e é submetido a um carregamento P no centro da barra, conforme Fig. (3).

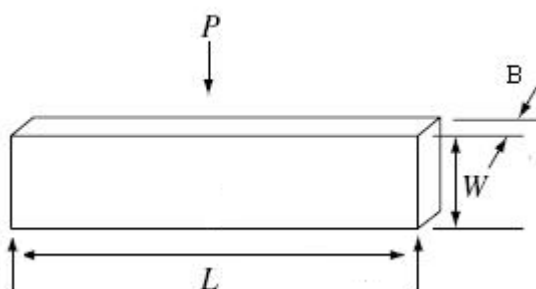


Figura 3. Ensaio de flexão em três pontos.

As dimensões dos corpos de prova para ensaio de flexão são definidas em normas técnicas como, por exemplo, a norma ASTM E399 (1996). Na Fig. (3), L é a distância entre apoios, W é a altura, B a largura e P é a carga aplicada.

No presente trabalho, será representado numericamente o ensaio de flexão para avaliar o compósito estudado, que têm como fase matriz o Zerodur® e como fase dispersa barras de aço carbono, dispostas conforme arranjo mostrado na Fig. (4). Espera-se que esta configuração da fase dispersa melhore a rigidez do compósito quanto a flexão, quando comparada com o comportamento de uma barra de mesmas dimensões feitas apenas com o material vitrocerâmico. Também se espera que as barras metálicas apresentem uma maior contribuição para resistir aos esforços de tração proveniente da flexão da barra. O comportamento deste campo de tensões nas barras e na interface dos constituintes também foi avaliado.

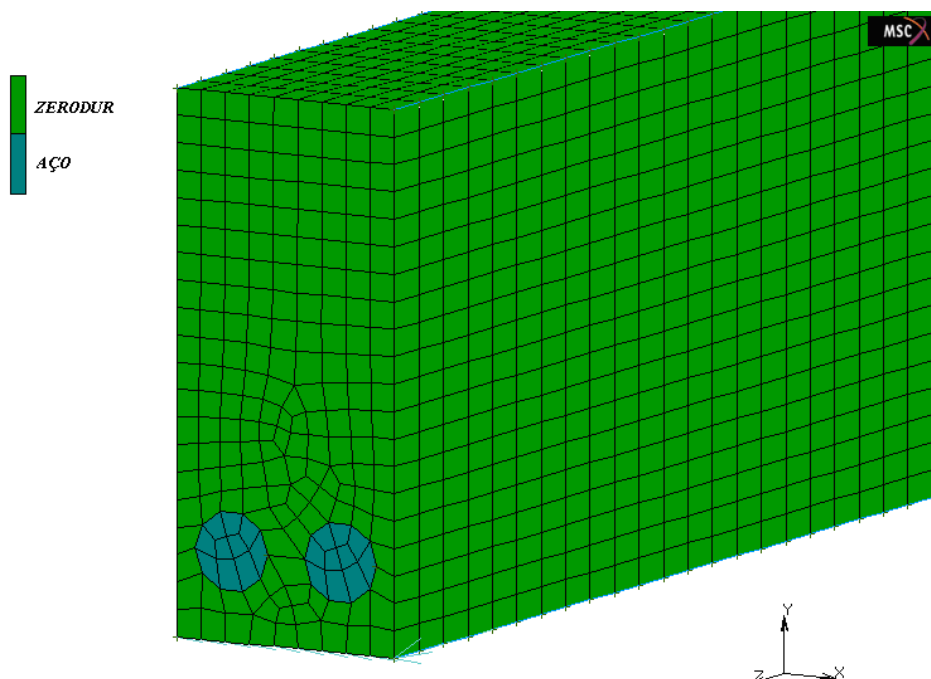


Figura 4. Compósito Zerodur®/Aço.

Utilizaram-se modelos numéricos de elementos finitos para simular o comportamento mecânico no ensaio de flexão. Inicialmente, simulou-se o comportamento de uma amostra do material vitrocerâmico e, em seguida, representou-se o compósito. A simulação numérica da barra biapoiada feita de Zerodur® foi modelada por elementos bidimensionais de quatro nós. Na representação numérica do compósito vitrocerâmico/aço utilizou-se um modelo com elementos tridimensionais hexagonais de oito nós, tendo em vista que a seção transversal do compósito não apresenta simetria, conforme Fig. (4).

Em uma etapa complementar, avaliou-se a região de interface (entre a matriz cerâmica e as barras de aço). Nesta região pode ocorrer o surgimento de trincas no material cerâmico devido à mudança do comportamento destes dois materiais quando submetidos ao esforço de tração devido a flexão. Estas tensões de tração na matriz vitrocerâmica, conforme ilustrado na Fig. (5), podem gerar trincas em torno da interface com as barras de aço. Estas trincas também podem ser potencializadas pela concentração de tensões devido à variação geométrica (furo) na matriz de Zerodur®.

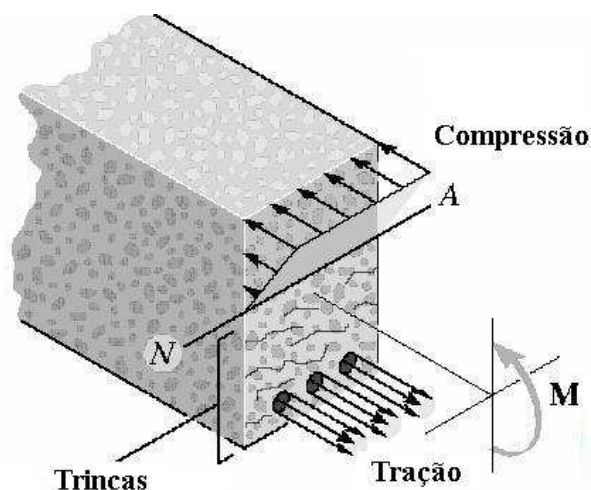


Figura 5. Comportamento do compósito quando submetido à flexão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras (6) e (7) mostram detalhes geométricos da malha bidimensional (Zerodur®) e da tridimensional (Zerodur®/Aço). Para modelar uma barra prismática biapoiada, restringiu-se o deslocamento nos apoios nas direções x

e y no modelo bidimensional e nas direções x, y e z no modelo tridimensional. Aplicou-se uma carga total de 500 N no meio do vão das amostras, conforme Fig (6) e Fig. (7).

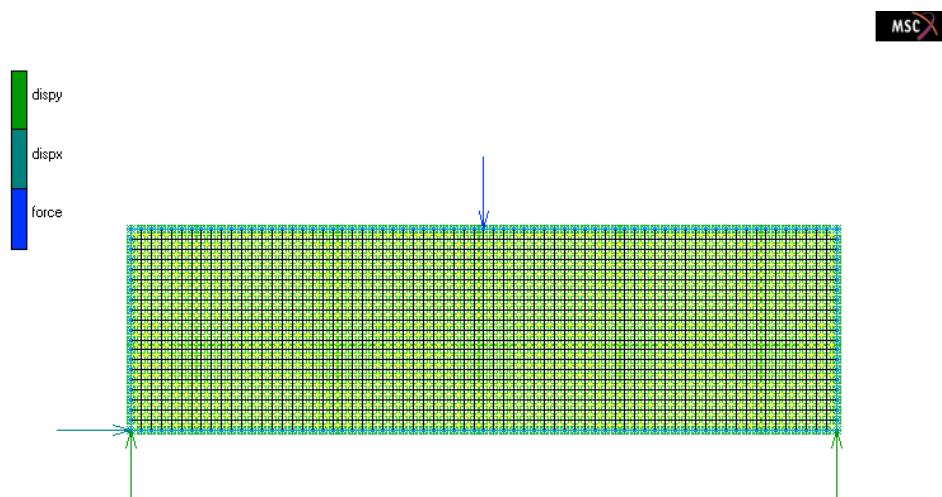


Figura 6. Malha bidimensional (vitrocerâmico Zerodur®).

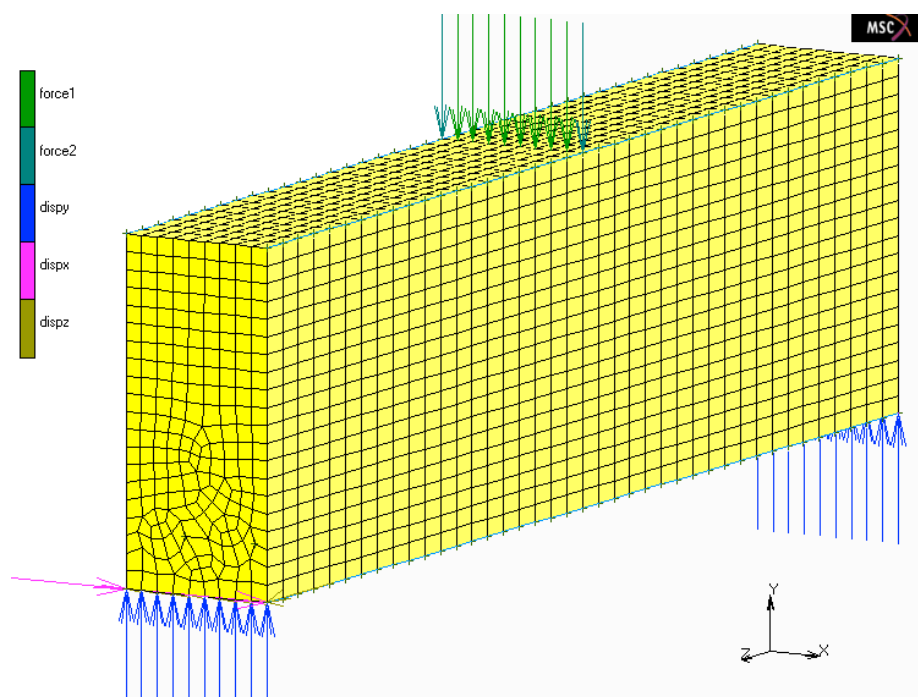


Figura 7. Modelo tridimensional (compósito Zerodur®/Aço).

Os resultados destes modelos numéricos foram comparados com o resultado analítico obtido através da equação de deflexão da linha elástica de uma barra biapoiada com uma carga aplicada no meio do vão, Eq. (1). Nesta expressão, Y_{max} é a deflexão máxima da barra que ocorre no meio do vão, F é a carga aplicada, l é a distância entre apoios, E é o módulo de elasticidade do material e I momento de inércia da seção transversal. Na simulação numérica desta barra biapoiada, adotaram-se os seguintes valores: distância entre apoios, $l = 2$ m; altura de 0,2 m e largura de 0,1 m. As barras de aço carbono possuem seção transversal circular de 3,5 cm de diâmetro.

$$Y_{máx} = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (1)$$

A Tabela (1) mostra as propriedades mecânicas adotadas para o vitrocerâmico e para o aço. Na etapa de calibração numérica, a malha do modelo tridimensional do vitrocerâmico utilizada possuía a mesma configuração da malha utilizada para representar o compósito. Porém, nesta calibração, não se inseriu as propriedades mecânicas do aço na amostra ensaiada.

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais constituintes (Matweb, 2010)

Material	Módulo de elasticidade (E)	Coefficiente de Poisson (ν)
Zerodur®	90 GPa	0,243
Aço	210 GPa	0,300

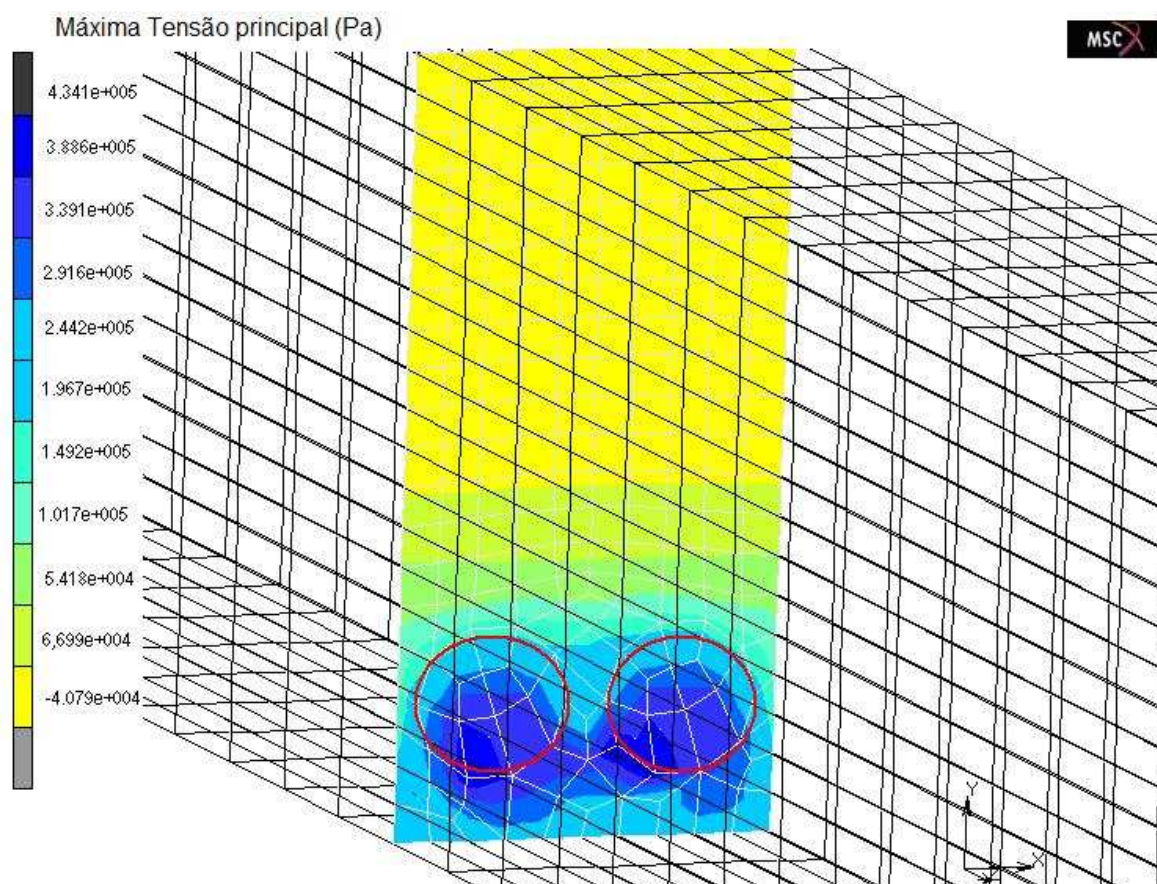
A comparação entre os valores de deflexão dos modelos numéricos e analítico estão apresentadas na Tab. (2). Os resultados numéricos se mostraram compatíveis com o comportamento da deflexão máxima de uma barra biapoada da Eq. (1).

Tabela 2. Valores de deflexão obtidos através dos modelos numéricos em comparação com a deflexão calculada através da equação da linha elástica.

Modelo	$Y_{máx}$ (mm)	DIFERENÇA (%)
Analítico	0,01389	-
Zerodur® bidimensional	0,01399	0,72
Zerodur® tridimensional	0,01419	2,16

Posteriormente, simulou-se o modelo tridimensional com inserção das barras de aço (compósito Zerodur®/Aço). Nesta análise, obteve-se uma deflexão no meio do vão de 0,01344 mm. Este valor representou uma diminuição no deslocamento da barra de aproximadamente 5,6% quando comparado com o modelo 3D do vitrocerâmico. Esta diminuição na deflexão indica um aumento da rigidez do compósito melhorando suas perspectivas de utilização em diversas estruturas.

A distribuição numérica das tensões principais na seção transversal do centro da barra do compósito Zerodur®/Aço, ao final do ensaio de flexão, está representada na Fig. (8). Pode-se verificar que a região de interface Zerodur®/Aço apresenta uma concentração de tensões. Para o material vitrocerâmico, esta região se mostra crítica segundo critério de Rankine (tensão normal máxima).

**Figura 8. Distribuição do campo da tensão principal no meio do vão no ensaio de flexão em três pontos.**

Em trabalho futuro, utilizar-se-á um modelo com trinca difusa para avaliar o comportamento frágil do Zerodur® (Dias *et al*, 2010) e, principalmente, para estudar a interface desta matriz cerâmico com o aço.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise numérica do material vitrocerâmico Zerodur® e do compósito Zerodur®/Aço via método dos elementos finitos (MEF). O comportamento mecânico foi avaliado numericamente através da simulação de uma viga biapoiada submetida ao esforço de flexão. Apesar do ganho no aumento da rigidez desta primeira análise ter sido pequeno (5,6%), espera-se que outras configurações como, por exemplo, a utilização de três barras de aço aumentem ainda mais a rigidez quanto a flexão deste compósito.

Os resultados ressaltam uma melhoria no desempenho mecânico do Zerodur® quando estruturado com barras de aço carbono. No entanto, deve-se estabelecer uma região propícia para inclusão das barras e um processo eficiente de junção dos materiais. Além de uma melhor avaliação do comportamento mecânico na interface entre os materiais constituintes do compósito supracitado. Uma nova alternativa é a de analisar o uso de outros materiais que possuam módulo de elasticidade superior ao do vitrocerâmico na fase dispersa como, por exemplo, o uso de fibras de carbono (Matweb, 2010).

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFSJ (Universidade Federal de São João del Rei – MG) pelo apoio e ao CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio e suporte financeiro.

7. REFERÊNCIAS

- ASTM E399, 1996, “Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures”. Danvers: ASTM. p.407-437.
- Berezhinsky, L. I., Grigoriev, O. N. and Serdega, B. K., 2004, “A polarization modulation method for study internal stresses in composite ceramics”, Powder Metall. Metal Ceram., 43, 19–201.
- Calister, W. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais, 2002, 5a Ed. LTC.
- Daniel, I. M.; Ishai, O., “Engineering mechanics of composite materials”, Oxford University Press, Inc., New York, NY, USA, 1994.
- Dias, A. M. S., Modenesi, P. J., Cristina, G. C., 2010, “Análise Numérica do Ensaio de Indentação em Materiais com Comportamento Frágil”, Revista Matéria (no prelo).
- Döhning, T., Hartmann, P., Jedamzik R., Thomas A., 2005, “Status of Zerodur Mirror Blank Production at SCHOTT”, Proc. SPIE Vol. 5869, pp.: 5-13.
- Hartmann P., Nattermann K., Kling G., Lucarelli S., Messerschmidt B., 2008, “ZERODUR Glass Ceramics Design of Structures with High Mechanical Stresses”, Proc. SPIE Vol.7018, 70180Q.
- Matweb, www.matweb.com, acessado em janeiro de 2010.
- MSC. MARC, 2007, “Volume A: Theory and User Information”, Manual do usuário.
- Mirkarimi P. B., Bajt S., Wall M. A., 2000, “Mo/Si and Mo/Be multilayer thin films on Zerodur substrates for extreme-ultraviolet lithography”, Optical Society of America, pp.: 1617-1625.
- Mirkarimi P. B., Baker S. L., Montcalm C., Folta J. A., 2001, “Recovery of multilayer-coated Zerodur and ULE optics for extreme-ultraviolet lithography by recoating, reactive-ion etching, and wet-chemical processes”, Optical Society of America, pp.: 62-70.
- Schmitz T. L., Evans C. J, Davies A., Estlerl W. T., 2002, “Displacement Uncertainty in Interferometric Radius Measurements”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, pp.: 451-454.
- Soufli R., Baker S. L., Windt D. L., Gullikson E. M., Robinson F. C., Podgorski W. A., Golub L., 2007, “Atomic force microscopy characterization of Zerodur mirror substrates for the extreme ultraviolet telescopes aboard NASA’s Solar Dynamics Observatory”, Optical Society of America, pp.: 3156-3163.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

NUMERICAL EVALUATION OF A VITROCERAMIC COMPOSITE DURING BENDING TESTING

Jader dos Santos Miranda, jader.smiranda@yahoo.com.br¹
Avelino Manuel da Silva Dias, avelino@ufsj.edu.br¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando, 170, São João Del-Rei, MG, CEP: 36307-352

Abstract. *The materials engineering has had significant advances last years. However, the need to develop effective materials for a variety of applications stimulates the study for application of composite materials and structures that are resistant to adverse conditions. Recent studies demonstrate the potential of certain classes of materials, special attention to the glass ceramic material called Zerodur®. This is your commercial name to this material that has low thermal expansion coefficient and it is widely used in equipment subjected to temperature variations, where it is necessary to maintained its initial shape and geometry. This material also has high hardness but has a brittle behaviour, typical of ceramic material. In order to improve these mechanical proprieties, it was proposed in the present article combine this vitroc ceramic material with steel (composite). With the aid of the finite element method makes it possible to analyze the overall behavior of this composite when subjected to external forces. It was used the finite element package Marc™ in the numerical analysis of a structure consists by Zerodur® and steel. The goal of this study is to determine the numerical behaviour of this new material subjected to the bending loading and analyse the fields of stress and strain at the composite's interface.*

Keywords: *Composites, Finite Element, Numerical Simulation, New Materials.*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.