



ESTUDOS DOS MECANISMOS DE FRATURA ATRAVÉS DE MODELOS NUMÉRICOS COM BIMODULARIDADE

Marcelo Gonçalves Pereira

Universidade Federal de São João del Rei. Praça Frei Orlando, 170, Departamento de Engenharia Mecânica - Centro, São João del Rei (MG) - Brasil. CEP: 36307-352.
marcelo08@yahoo.com.br

Danilo Amorim da Silva

amorim8silva@yahoo

Avelino Manuel da Silva Dias

avelino@ufsj.edu.br

Resumo: No presente trabalho utilizou-se o Método dos Elementos Finitos juntamente com os conceitos da mecânica dos meios contínuos para avaliar numericamente os ensaios de fratura em diferentes classes de materiais. A análise destes processos de fratura foi feita através do solver comercial de elementos finitos MARCTM, que disponibiliza alguns modelos de dano originados dos conceitos da mecânica clássica. Dentre estes, encontra-se o modelo constitutivo com bimodularidade, capaz de incorporar características frágeis, através de uma curva de tensão versus deformação. Este modelo considera que o material apresenta um comportamento frágil quando solicitado à tração e um comportamento elastoplástico sob compressão. Foram simulados os ensaios de tração com corpos de prova compactos, os quais são utilizados para determinação do fator de intensificação de tensões crítico (K_{IC}). Nestes ensaios foram estudados materiais que apresentam um comportamento que se assemelha ao modelo de bimodularidade, o carboneto de tungstênio com 6% de cobalto (WC-6Co) e um cerâmico (Al_2O_3).

Palavras-chave: Método dos Elementos Finitos, Bimodularidade, Fratura.

1. INTRODUÇÃO

A falha de materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejável por inúmeros motivos, tais como, perdas econômicas, a interferência na disponibilidade de produtos e serviços e em alguns casos, vidas humanas podem ser colocadas em perigo. Embora as causas de falhas e o comportamento de materiais possam ser conhecidos, a sua prevenção pode ser difícil de ser garantida. Estas falhas podem ser causadas por seleção do processamento dos materiais de uma maneira não apropriada, projeto inadequado do componente, sua má utilização e erros em operação. É uma das responsabilidades do engenheiro antecipar e planejar considerando possíveis falhas e, no caso da ocorrência deste evento, avaliar a sua causa e então tomar as medidas de prevenção apropriadas.⁽¹⁾

Recentes metodologias abordam o problema de falhas através do acoplamento de modelos numéricos com o regime macroscópico da estrutura. Nesta vertente, têm sido utilizados modelos discretos de elementos finitos juntamente com os conceitos da mecânica da fratura e da mecânica dos meios contínuos através da avaliação do dano de uma estrutura. Estas abordagens vêm sendo desenvolvidas, tanto para a análise de falhas estruturais em materiais frágeis, quanto para materiais dúcteis. Contudo, a correta incorporação de aspectos mecânicos e fenomenológicos inerentes 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.⁽²⁾

Este trabalho teve como proposta estudar e simular os ensaios da mecânica fratura, que têm sido utilizados para caracterização da tenacidade a fratura em diferentes classes de materiais. O objetivo foi utilizar o Método dos Elementos Finitos (*MEF*), o qual é uma técnica numérica confiável para análise de tensões, em conjunto com os conceitos da mecânica dos meios contínuos e da mecânica da fratura linear elástica (*MFLE*) para reproduzir modelos numéricos dos ensaios de fratura em um material cerâmico e em um metal duro.^(2, 3) Para incorporar aos modelos numéricos mecanismos capazes de analisar processos de fratura, foi utilizada uma relação constitutiva baseada em modelos clássicos da mecânica dos meios contínuos, também conhecida como modelo de trinca difusa ou bimodularidade.⁽⁴⁾

2. METODOLOGIA.

A Figura 1 ilustra um corpo de prova compacto (CT) muito utilizado para a obtenção do fator de intensificação crítico (K_{IC}) de materiais utilizando-se os conceitos da mecânica da fratura linear elástica.

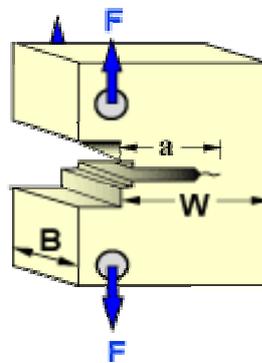


Figura 1. Corpo de prova compacto (CT) para ensaio de tração.

Para garantir a existência do estado plano de deformações, a ASTM E-399⁽⁵⁾ estabelece algumas relações entre as propriedades mecânicas e geométricas do material, Tab. 1. Se todos os requisitos para a validade do ensaio forem atendidos, o valor K_Q encontrado através da Eq. (1) corresponde ao fator de intensidade de tensões crítico K_{IC} .

$$K_Q = \frac{P_Q}{B \sqrt{W}} Y \quad (1)$$

Tabela 1. Dimensões dos modelos do corpo de Prova Compacto (CT).

	W (mm)	B, a (mm)	P_Q (N)
WC-6Co	0,1635	0,08175	1,08
Al₂O₃	2,0000	1,00000	18,52

Inicialmente, este ensaio foi simulado através de uma análise bidimensional do problema, modelando-o com elementos planos isoparamétricos de oito nós, Fig. 2(a). Para representar adequadamente a singularidade na ponta da trinca, deve-se ter uma atenção especial com o grau de refinamento e a forma desta malha nessa região. Contudo, malhas muito refinadas podem melhor representar o problema, mas implicam em um maior tempo de resolução. Por isso, foram testados modelos com diferentes configurações de malha, buscando reduzir o número de elementos nas malhas sem comprometer os resultados numéricos.

A partir da melhor malha bidimensional, foi gerado o modelo tridimensional do ensaio, utilizando elementos sólidos isoparamétricos de 20 nós, conforme mostra a Fig2(b).

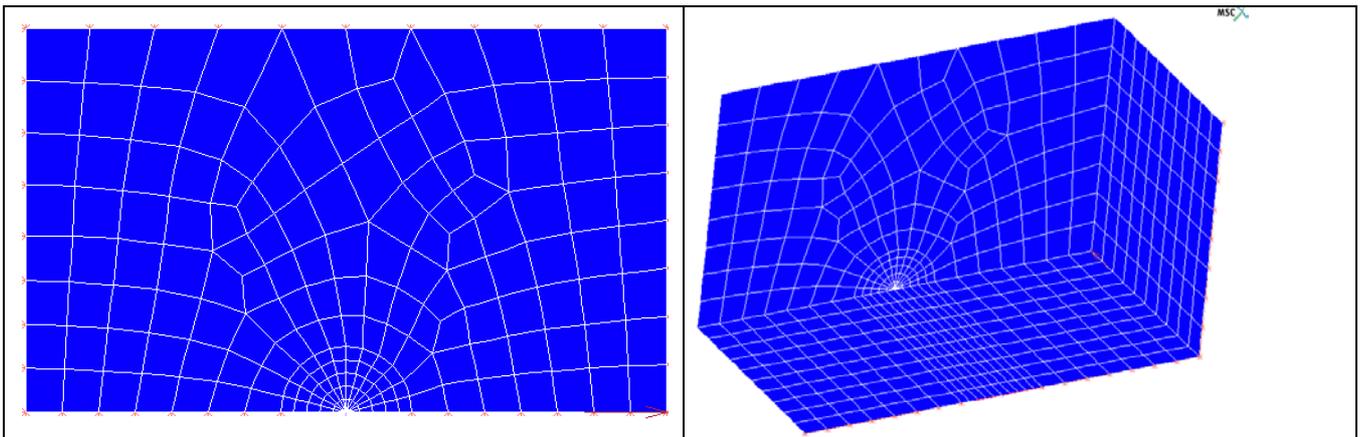


Figura 2. (a) Modelo bidimensional; (b) Modelo Tridimensional

2.1 Avaliação dos parâmetros do modelo de trinca difusa

Adotando-se a metodologia sugerida por Zhang e Subhash ⁽⁶⁾, o valor para a deformação total pode ser estimado considerando-se uma abertura de trinca máxima (u) de 5 μm para materiais frágeis. A partir deste valor de abertura da trinca e considerando um comprimento característico para o elemento finito (e), possibilita-se computar o valor da deformação total (ε) neste elemento antes que ele sofra o colapso, segundo a Eq. (2).

Uma vez conhecida esta deformação total e conhecendo a deformação elástica do material estudado (ε_e), pode-se avaliar a deformação de trincamento máxima (ε_{cr}) de acordo com a Eq. (3). Finalmente, utilizando-se o valor adotado para a tensão crítica (σ_{cr}), Tabela 2, foi possível avaliar o parâmetro de amolecimento do módulo de amolecimento (E_S) através da Eq. (4).⁽⁷⁾

$$u = \varepsilon * e \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{cr} \quad (3)$$

$$\sigma_{cr} = E_S \varepsilon_{cr} \quad (4)$$

A evolução de trincas em uma estrutura resulta em uma diminuição de sua capacidade de resistência à carga, assim o campo de tensões internas deve ser redistribuído para regiões onde ainda não ocorreram falhas. Consequentemente, a simulação numérica destes problemas se torna uma análise não linear.⁽⁴⁾ Este modelo de bimodularidade apresenta bons resultados globais quando a zona de fissura está restrita a pequenas dimensões em comparação com o tamanho da estrutura.

2.2 Aplicação do Modelo de Trinca Difusa (Bimodularidade) em ensaios da Mecânica da Fratura

Inicialmente foi feita a calibração do modelo numérico em um óxido de alumínio (Al_2O_3), também conhecido como alumina, e em seguida utilizou-se o carboneto de tungstênio com 6% de cobalto ($WC-6Co$). As dimensões utilizadas e a carga aplicada nos modelos numéricos encontram-se na Tabela 1. Na Tabela 2, se encontram as propriedades mecânicas utilizadas para representar o comportamento do $WC-6Co$ e do Al_2O_3 . O módulo de Young (E), o coeficiente de Poisson (ν) e o limite de escoamento (σ_y) foram determinados experimentalmente por Zeng e Chiu ⁽⁸⁾ a partir da

técnica da nanoindentação instrumentada. O valor da *integral J* foi encontrado utilizando-se a Eq. (5) que o relaciona com K_{IC} .

$$J_{el} = \frac{K_{IC}^2(1-\nu^2)}{E} \quad (5)$$

Tabela 2. Propriedades Mecânicas do Al_2O_3 e $WC-6Co$ ^(2, 9)

	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_{cr} (MPa)	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	J_{el} (Pa.m)
Al_2O_3	370	0,22	3000	400	4.0	41.15
$WC-6Co$	619.5	0,28	5760	3750	10.0	146,29

2.1.1 Calibração do Modelo

Visando estudar os mecanismos de fratura através da análise numérica de ensaios mecânicos bidimensionais e tridimensionais, foi utilizado o modelo do corpo de prova compacto para estudar o comportamento mecânico destes dois diferentes materiais, o metal duro e a alumina, Fig. 2. Inicialmente, verificou-se o valor numérico do K_{IC} para estes modelos do corpo de prova compacto. Em seguida avaliou-se o campo de tensões na ponta da trinca. Posteriormente, implementou-se este modelo com o propósito de calibrar o modelo de bimodularidade.

2.1.2 Cálculo do Módulo de Amolecimento para os Modelos 2D e 3D

Para se calcular o módulo de amolecimento (E_s) conforme a curva tensão versus deformação da Fig. 3, foi necessário determinar o valor da deformação elástica (ε_e), utilizando a Eq. (6).

$$\sigma_{cr} = E\varepsilon_e \quad (6)$$

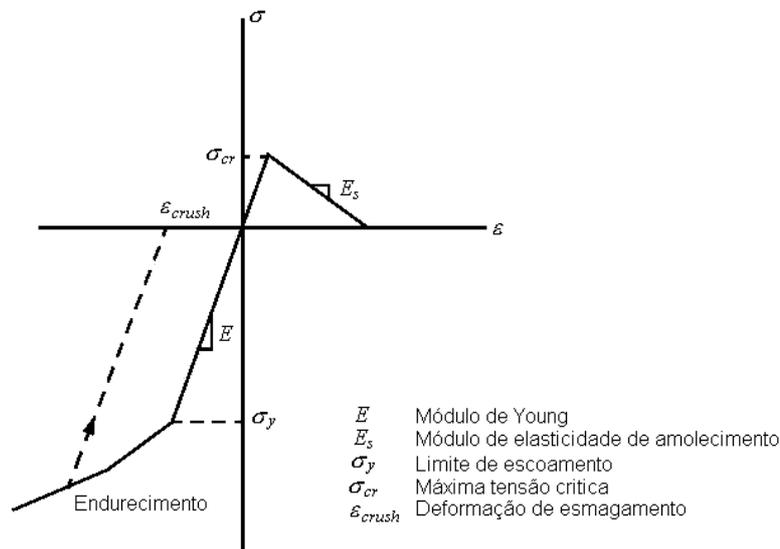


Figura 3. Diagrama uniaxial de tensão *versus* deformação para modelo de trinca difusa. ⁽¹⁰⁾

Em seguida calculou-se a deformação total (ε) de acordo com a Eq. (2). Nesta etapa foi preciso encontrar o valor do comprimento característico do elemento, representado na Fig. 4. Este parâmetro é a maior diagonal do menor elemento da malha, para, em seguida, avaliar o valor da deformação crítica (ε_{cr}). Encontrada esta deformação crítica para ambos os materiais, determina-se o valor do módulo de amolecimento (E_s), utilizando-se a Eq. (3), Tabela 3. Estes parâmetros foram utilizados na entrada de dados do solver *MARC*TM, para implementar o modelo de trinca difusa.

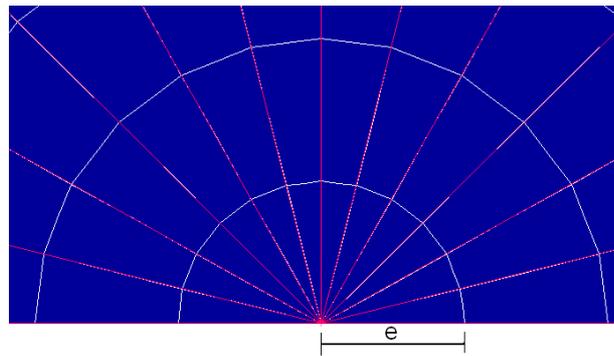


Figura 4. Comprimento característico do elemento.

Tabela 3. Valores obtidos para o Módulo de Amolecimento

Modelo Bidimensional		
	WC-6Co	Al₂O₃
Máxima tensão crítica (MPa)	3750	400
Comprimento Característico(m)	0,335e-5	0.060e-3
Deformação elástica	0.00605	0,0108
Deformação crítica	1.486	0,0725
Módulo de amolecimento(GPa)	2,52	5,52
Modelo Tridimensional		
	WC-6Co	Al₂O₃
Comprimento Característico(m)	8,835e-6	116,63e-6
Deformação elástica	0.00605	0,0108
Deformação crítica	0,5599	0,0321
Módulo de amolecimento(GPa)	6,70	12,48

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Após avaliação do parâmetro de amolecimento do módulo de elasticidade (E_S) para ambos os materiais, WC-6Co e Al₂O₃, aplicou-se o modelo de trinca difusa (bimodularidade) na simulação numérica. Além do valor de E_S calculado, conforme Tabela 3, foram utilizados dois outros valores com o objetivo de estimar o referido parâmetro. Os resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5 mostram os valores numéricos obtidos da tensão de Von Mises e da deformação de trincamento para os modelos bidimensional e tridimensional na simulação do corpo de prova compacto.

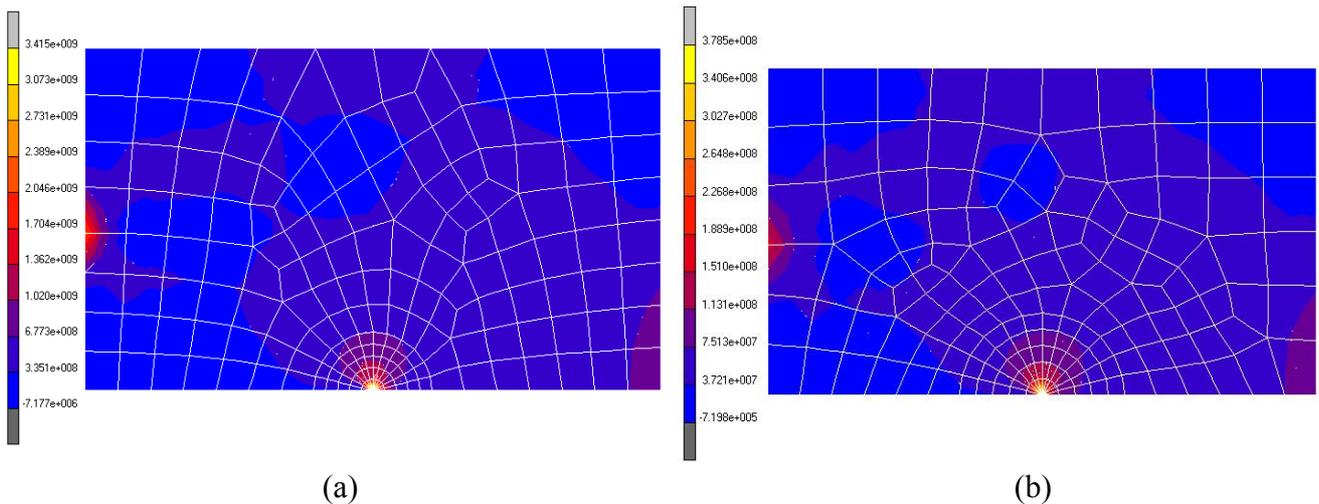
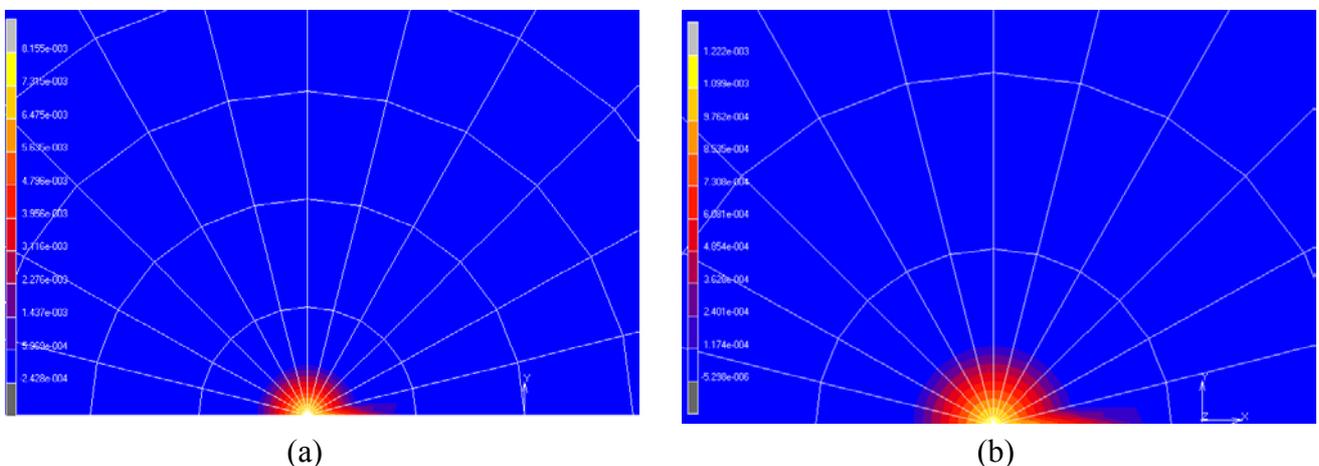
Tabela 4. Tensões e deformações na ponta da trinca para diferentes E_S , para modelos 2D.

Modelo Bidimensional		
WC-6Co		
E_S (GPa)	Tensão de Von Mises (MPa)	Deformação normal de trincamento
2,52	3415	8,155e-3
36	3398	8,288e-3
90	3533	8,246e-3
Al₂O₃		
E_S (GPa)	Tensão de Von Mises (MPa)	Deformação normal de trincamento
5,52	374	1,222e-3
30	351,7	1,233e-3
50	424,3	1,268e-3

Tabela 5. Tensões e deformações na ponta da trinca para diferentes E_S , para modelos 3D.

Modelo Tridimensional		
WC-6Co		
E_S (GPa)	Tensão de Von Mises (MPa)	Deformação normal de trincamento
6,7	4126	6,543e-3
60	4186	6,612e-3
100	4121	6,658e-3
Al_2O_3		
E_S (GPa)	Tensão de Von Mises (MPa)	Deformação normal de trincamento
12,48	443,3	1,009e-3
37	443,3	1,009e-3
50	418,8	1,015e-3

A Fig. 5 ilustra o campo de tensões para o carboneto de tungstênio com cobalto e para a alumina, respectivamente, para os corpos de prova compactos. Os resultados numéricos das deformações de trincamento estão mostrados na Fig. 6, para o WC-6Co e a Al_2O_3 . Nestas figuras é possível observar que a região da ponta da trinca se mostra propensa ao crescimento de fissuras, como era esperado. Estes resultados numéricos comprovam que o modelo numérico de trinca difusa consegue bem representar a ponta da trinca como uma região crítica nos modelos simulados.

Figura 5. Distribuição das tensões de Von Mises (Mpa) para (a) WC-6Co; e, (b) Al_2O_3 Figura 6. Deformação de trincamento para (a) WC-6Co; e, (b) Al_2O_3

As Figs. 7 e 8 ilustram a região de deformação de trincamento à frente da face da trinca para o WC-6Co e o Al_2O_3 , respectivamente. Nestas simulações utilizaram modelos tridimensionais para representar o ensaio com corpos de prova compactos. Novamente verifica-se o modelo constitutivo de bimodularidade consegue indentificar a região da face da trinca como crítica. Estes resultados numéricos comprovam que o modelo de trinca difusa consegue representar bem o comportamento de regiões propensas a nucleação e crescimento de fissuras também em modelos tridimensionais.

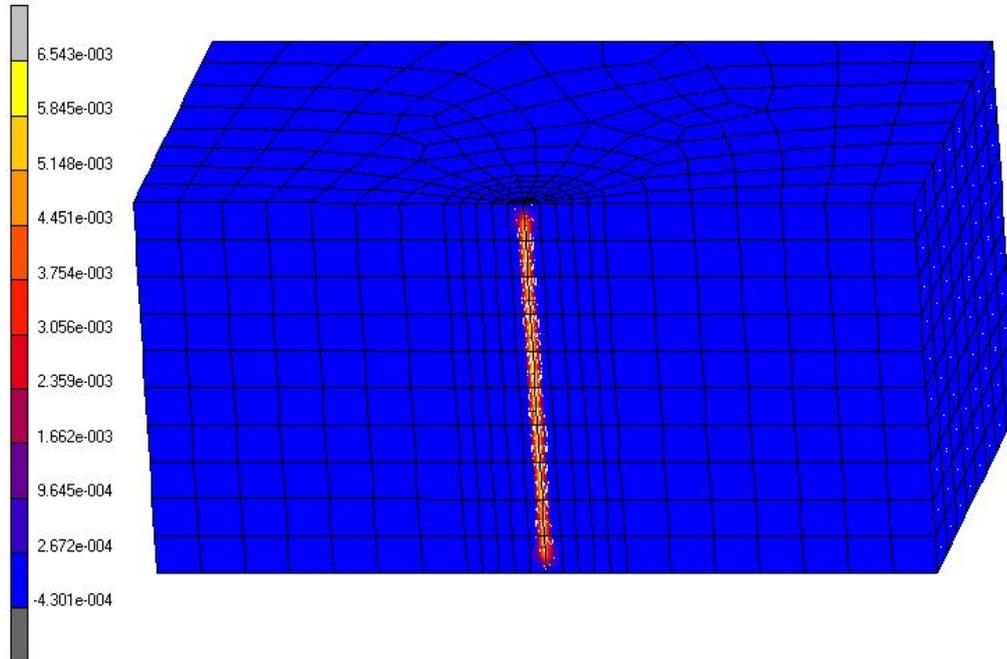


Figura 7. Deformação de trincamento na face da trinca para o WC-6Co

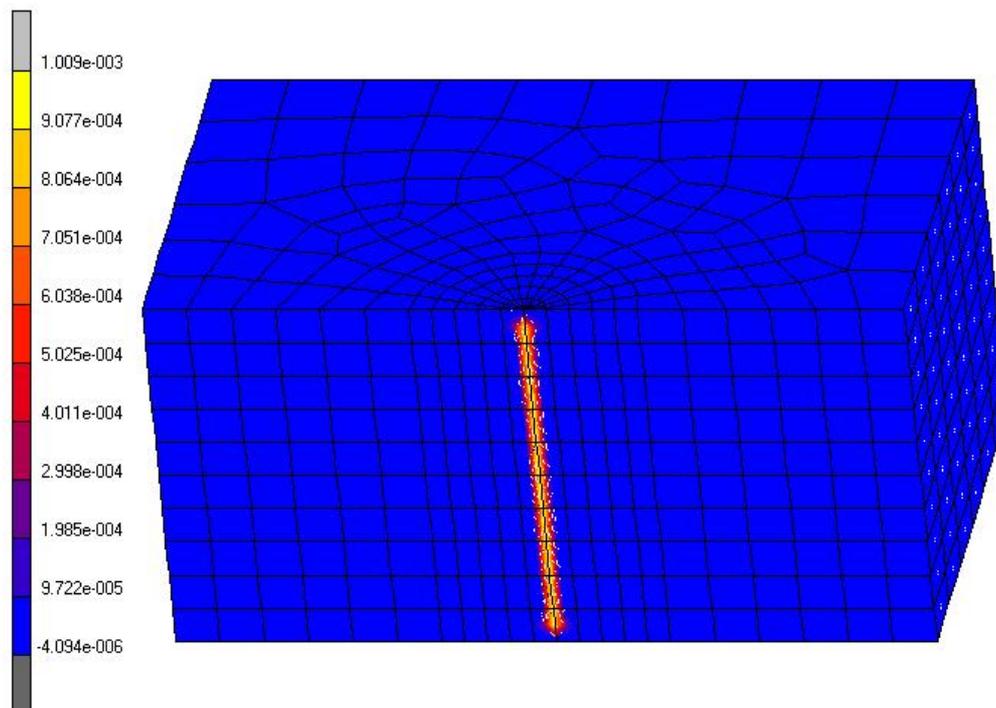


Figura 8. Deformação de trincamento na face da trinca para o Al_2O_3

4. CONCLUSÕES

Na Tabela 4, foram apresentados os valores do módulo de amolecimento utilizados nos diversos modelos numéricos implementados. Para o WC-6Co verifica-se que houve uma pequena variação dos valores de tensão e deformação de trincamento, tanto para os modelos bi e tridimensionais, e para o Al₂O₃ observa-se uma maior variação nos valores de tensão e deformação de trincamento no modelo bidimensional, não sendo observado no modelo tridimensional. Pela Tabela 4, nota-se que caso seja desconhecido o valor do módulo de amolecimento (E_S), pode-se estimá-lo como sendo um décimo do valor do módulo de Young do material utilizado. Uma vez que se verificou que os valores estimados apresentaram bons resultados para os campos de tensões e deformações, em comparação com os valores calculados de E_S para os modelos 2D e 3D.

Pela simulação numérica do corpo de prova compacto bidimensional e tridimensional com o modelo constitutivo de bimodularidade foi possível verificar que os mesmos conseguem representar o comportamento mecânico do WC-6Co. Como era de se esperar, a região na ponta da trinca atingiu o limite de ruptura, sendo possíveis observar deformação de trincamento (cracking strain), Figs. 6a e 7. Comportamento semelhante se obteve para o Al₂O₃, embora este material cerâmico não costume apresentar uma capacidade de sofrer grandes deformações elastoplásticas, Fig. 6b e 8.

Finalmente, o modelo de bimodularidade foi capaz de representar o comportamento do WC-6Co de suportar grandes deformações plásticas sob compressão e de apresentar características frágeis sob tração. As simulações numéricas mostraram que o modelo é capaz de capturar algumas características da formação de trincas durante ensaios convencionais de mecânica da fratura. Este modelo de bimodularidade também se mostrou eficiente para ser adotado na simulação numérica de processos de fratura do Al₂O₃, indicando que pode ser possível implementá-lo em outras análises de fratura como, por exemplo, o ensaio de indentação em recobrimentos superficiais finos.

5. AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) à UFSJ (Universidade Federal de São João del Rei) pelo apoio financeiro e técnico. A todos os professores e alunos do grupo de pesquisa do Laboratório de Mecânica Computacional do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSJ.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) WILLIAM CALISTER, Jr. “Ciência e Engenharia de Materiais”, 2002, 5ª Ed. LTC.
- 2) DIAS, A. M. S., “Análise Numérica do Processo de Fratura no Ensaio de Indentação Vickers em uma Liga de Carboneto de Tungstênio com Cobalto”, Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 200p, 2004.
- 3) DIAS, A. M. S.; MODENESI, P. J.; GODOY, C., “Computer Simulation of Stress Distribution During Vickers Hardness Testing of WC-6Co”. Materials Research, Vol. 9, No. 1, 73-76, 2006.
- 4) OLLER, S., “Fractura Mecânica – Um Enfoque Global”, 2001, CIMNE – Barcelona, Espanha, 1ª Edição.
- 5) ASTM E – 399. “Standart Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materias”, 1990.
- 6) ZHANG, W., SUBHASH, G., An Elastic-Plastic-Cracking Model for Finite Element Analysis of Indentation Cracking in Brittle Materials, International Journal of Solids and Structures, v. 38, pp. 5893-5913, 2001.
- 7) DIAS, A. M. S., MODENESI, P. J., GODOY, C. & CETLIN, P. R., Análise Numérica do Ensaio de Indentação em WC-6Co, Revista Matéria, v.10, n. 1, p568-577, 2005.
- 8) ZENG, K., CHIU, C., “An Analysis of Load-Penetration Curves from Instrumented Indentation”, Acta Materialia, 49, pp.3539-3551, 2001.
- 9) www.matweb.com, Material Type, Ceramics, Mechanical Properties de Aluminum Oxide, Alumina, 99,9 %, Al₂O₃.
- 10) Msc.MARC, “Volume A: Theory and User Information”, 2005, Users Manual

7. DIREITOS AUTORAIS

Marcelo Gonçalves Pereira

Universidade Federal de São João del Rei. Praça Frei Orlando, 170, Departamento de Engenharia Mecânica - Centro, São João del Rei (MG) - Brasil. CEP: 36307-352.
marcelo08@yahoo.com.br

Danilo Amorim da Silva

amorim8silva@yahoo

Avelino Manuel da Silva Dias

avelino@ufsj.edu.br