

# MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE ESTRUTURAS TRINCADAS

**Walter Jesus Paucar Casas**  
**Rafael Ramanzini**  
**Clóvis Geordane Fernandes**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite 425, CEP 90050-170, Porto Alegre – RS, [walter.paucar.casas@ufrgs.br](mailto:walter.paucar.casas@ufrgs.br)

**Resumo.** *O tratamento computacional de estruturas soldadas trincadas utilizando princípios da mecânica da fratura é pouco desenvolvido na literatura especializada disponível. Nesse contexto há necessidade de uma adequada plataforma computacional para modelagem tridimensional de estruturas soldadas trincadas, com o objetivo posterior de ser utilizada em estruturas reais. Para essa finalidade são avaliadas ferramentas computacionais acadêmicas disponíveis como o OSM, BES e FRANC3D. Diversas dificuldades associadas à falta de literatura específica para modelagem de estruturas soldadas, interface do programa e complexidade do problema, devem ser consideradas para testar essa plataforma.*

**Palavras-chave:** *elementos de contorno, trincas, fratura, fadiga.*

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades do projeto de pesquisa *Integridade Estrutural em Uniões Soldadas: Influência das Tensões Residuais e Mudanças Microestruturais Geradas por Soldagem na Tenacidade à Fratura e Propagação de Trincas por Fadiga* estão relacionadas à aplicação da mecânica da fratura no estudo da fratura e fadiga em estruturas soldadas trincadas.

A literatura convencional de mecânica da fratura, por exemplo, Anderson (1995), pouco aborda sobre estruturas soldadas, embora já exista literatura especializada sobre o tema, por exemplo, Branco (1986). Interessa também considerar os tipos de ensaios padronizados, normas e códigos da indústria para esse tipo de estruturas, Contudo, o tratamento computacional do problema ainda carece de suporte bibliográfico suficiente. Devido aos elevados custos dos ensaios experimentais e a enorme quantidade de variáveis associadas às estruturas soldadas, encontra justificativa a intenção de simular estruturas soldadas fissuradas, para comparação posterior dos resultados computacionais com valores de tenacidade e velocidade de fissuração experimentais, previamente obtidas em pesquisas prévias.

O projeto de pesquisa irá posteriormente ser aplicado na integridade de rotores de turbinas hidráulicas. Seja na fabricação das uniões soldadas das pás nos rotores ou no reparo de áreas trincadas, as quais ainda podem ficar em regiões cavitadas, torna importante um controle da tenacidade da região soldada, bem como da sua resistência à propagação de trincas por fadiga, de forma a programar com melhor exatidão o reparo/manutenção dessas estruturas críticas.

Inicialmente e para validação da metodologia a ser desenvolvida, a pesquisa usa nas primeiras etapas uniões soldadas com a mesma geometria dos corpos de prova homogêneos padronizados dos ensaios para determinação experimental da tenacidade à fratura e propagação de trinca de fadiga, tanto para o material base como para a junta soldada.

Os objetivos gerais do projeto de pesquisa são:

- Gerar uma sistemática de análise que possibilite a avaliação das tensões residuais e mudanças microestruturais geradas durante a soldagem e ainda após provável tratamento térmico, identificando a sua influência na tenacidade à fratura e na velocidade de crescimento de trinca por fadiga em juntas soldadas.
- Considerando a limitação da pesquisa pela escolha de um dado material, neste caso usado em turbinas hidráulicas, uma segunda finalidade é avaliar a influência das tensões residuais e das variações microestruturais na tenacidade e propagação de trincas por fadiga de juntas soldadas da liga CA6NM.
- Criar uma base de dados que forneça informação direta dos processos de soldagem e tratamentos térmicos, no que diz respeito à evolução dos campos de temperatura, taxas de aquecimento e esfriamento, estrutura metalúrgica do material, distorções, tensões residuais, resistências ao escoamento do material modificado e deformações plásticas. Esses dados logo poderão ser igualmente obtidos em geometrias mais complexas.

Nesse contexto, os objetivos específicos desse trabalho têm a ver com a dificuldade da modelagem tridimensional de estruturas trincadas, para posterior determinação da tenacidade na frente da trinca e sua validação com dados experimentais, previamente obtidos por Novicki (2002).

## 2. MODELAMENTO GEOMÉTRICO E ANÁLISE DE FRATURA

A modelagem computacional do problema utiliza três programas. O OSM (Object Solid Modeler) é usado para a geração do modelo geométrico. O FRANC3D (3D FRacture ANalysis Code) é o responsável, a partir da geometria do modelo, pela atribuição das propriedades, geração da malha, introdução e propagação das fissuras em três dimensões (Franc3D, 1998). A análise da estrutura utiliza o programa BES (Boundary Element System), este baseado no método dos elementos de contorno. A aplicação desse método pode ser revista em Aliabadi e Rooke (1991) e Aliabadi (2001).

A justificativa da utilização de um programa 3D, mais completo que um 2D, reside no fato de que as trincas em uniões soldadas estariam mais bem representadas nesse ambiente. A simulação de estruturas envolve, além da análise numérica, todos os aspectos do processo de modelagem, desde a preparação dos dados iniciais até a visualização dos resultados finais. O programa FRANC3D incorpora segundo Moretti e Bittencourt (1998):

- Ferramentas de modelagem de sólidos
- Uma estrutura de dados topológicos que permite que a topologia seja separada da geometria
- A associação de atributos do modelo com as primitivas topológicas
- Uma hierarquia de modelos topológicos para organizar e guiar o processo de discretização
- Uso de computação gráfica interativa em estações de trabalho de alto desempenho

O processo de simulação de uma fissura é um processo incremental, onde uma série de passos é repetida para a progressão dos modelos. Cada iteração do processo utiliza resultados já obtidos e representa uma configuração da fissura.

Os passos principais envolvidos no processo são, (Moretti e Bittencourt, 1998):

- Representação do modelo
- Representação topológica de fissuras e de propagação de fissuras
- Discretização e geração da malha
- Especificação de atributos
- Propagação de fissuras

A literatura reporta diversas utilizações dessa plataforma. Um modelo em três dimensões utilizando o FRANC3D foi desenvolvido por Sandera et al. (1998) para estudar o crescimento intergranular de trinca estável num corpo de prova CT de material homogêneo no local de processo, Fig. (1). Nesse caso pretende-se simular as condições que ocorrem na frente de uma pré-trinca de fadiga, durante a fissuração de corrosão-tensão ou no caso de fratura frágil. Para avaliar a

estabilidade dessa trinca com ramificações intergranulares, Fig. (2), o fator de intensidade de tensões efetivo global  $K_{eff}$  na sua frente é calculado. A solução numérica dos valores locais  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_{eff}$ , utilizando o FRANC3D, é comparada ainda com a solução analítica disponível para uma frente de trinca com ramificações relativamente simples.

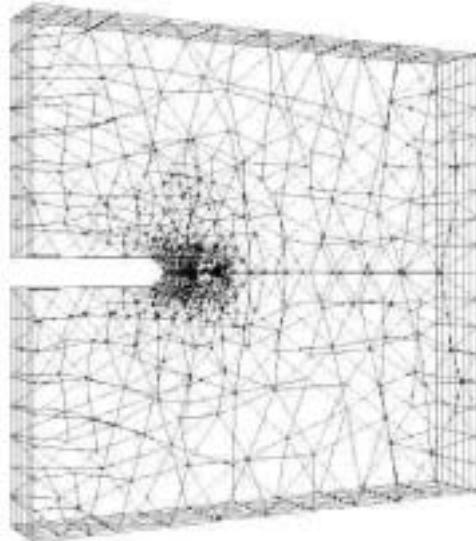


Figura 1. Malha de elementos de contorno em corpo CT (Sandera et al., 1998)

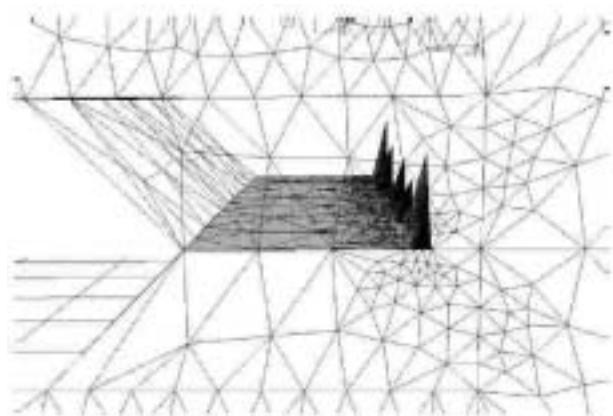


Figura 2. Pré-trinca e subtrinca com pequenas ramificações (Sandera et al., 1998)

### 3. RESULTADOS

Obteve-se no decorrer deste trabalho, a simulação em um corpo de prova simples, para resultados comparativos. Para tanto, o procedimento a seguir foi utilizado:

- Criação do modelo geométrico; atribuição das condições de contorno e geração da malha. As condições de contorno foram as de engaste em uma extremidade e carregamento de tração unitário na face posterior. A Fig. (3) ilustra este modelo.

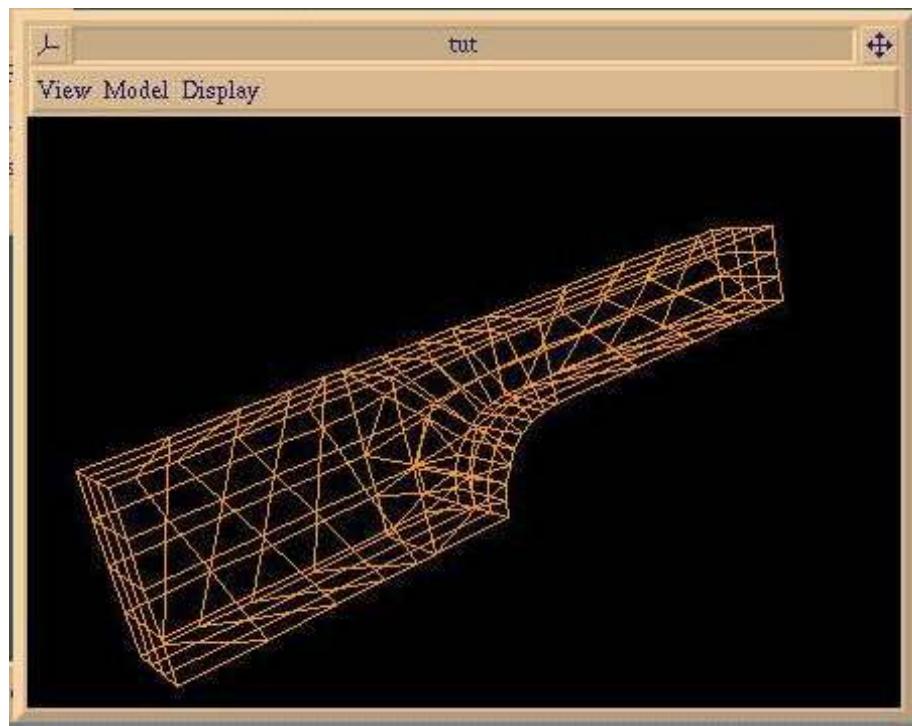


Figura 3. Modelo.

- Realiza-se então uma primeira análise para verificar se as condições de contorno estão corretas. Comparando com a bibliografia disponível, observa-se que o modelo está de acordo, Fig. (4).

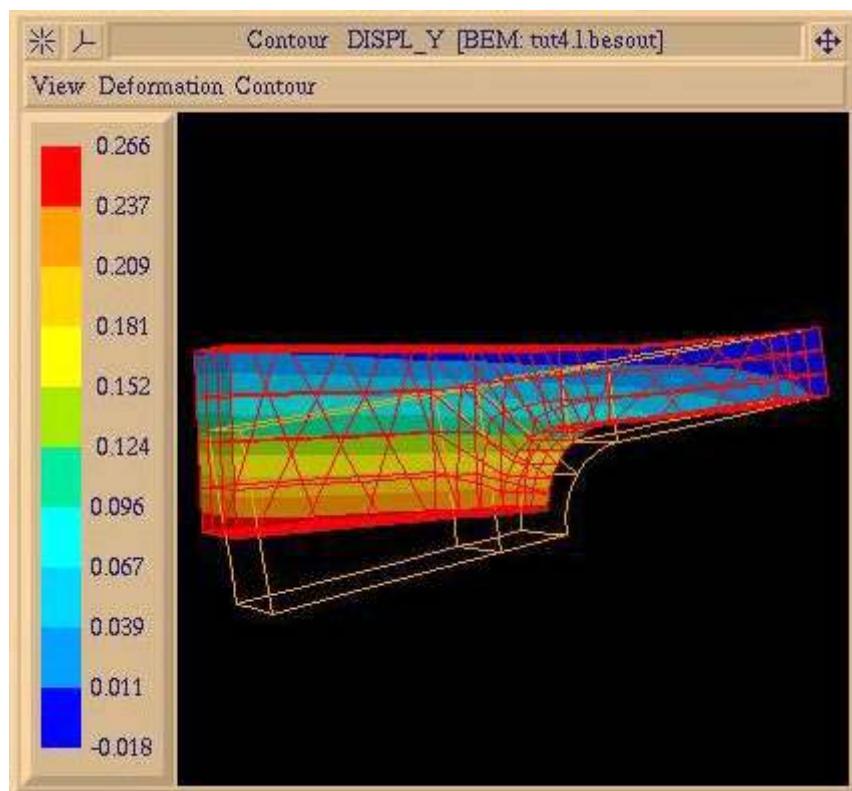


Figura 4. Modelo deformado.

- Introduz-se uma fissura no modelo e gera-se então uma nova malha, Fig. (5).

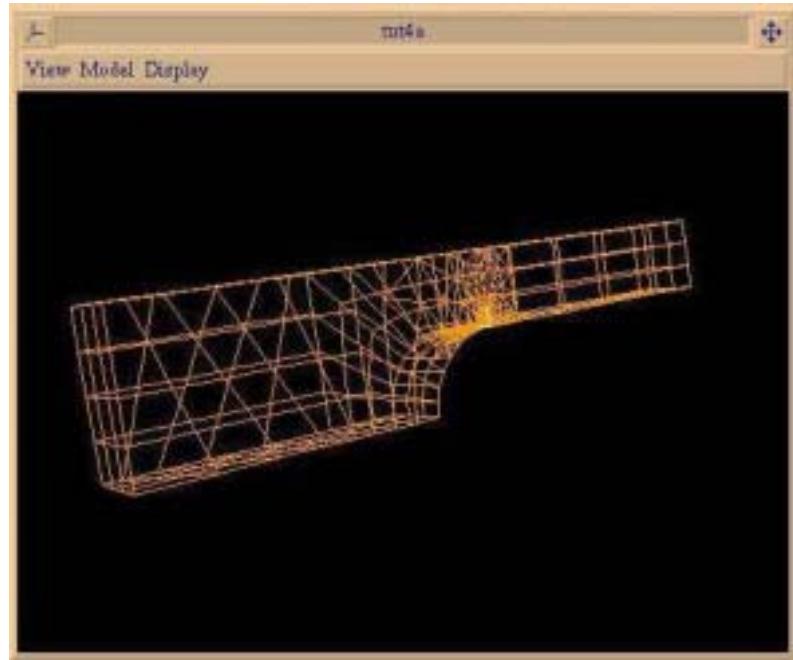


Figura 5. Malha com a trinca.

- Com a nova malha, realiza-se a análise novamente, podendo-se visualizar a fissura propagada, Fig. (6).

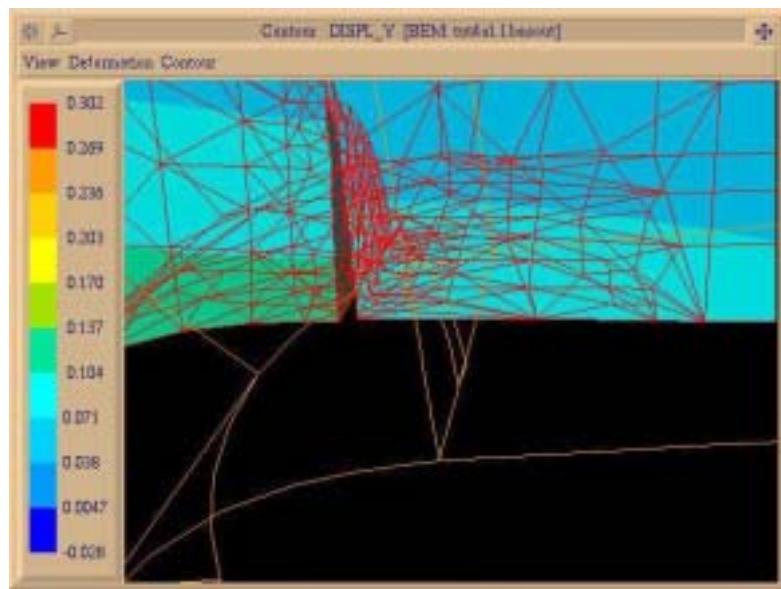


Figura 6. Trinca – Primeira propagação.

- É possível então a análise de fraturamento. Podem-se obter os fatores de intensidade de tensão para os três modos, como mostra a Fig. (7).

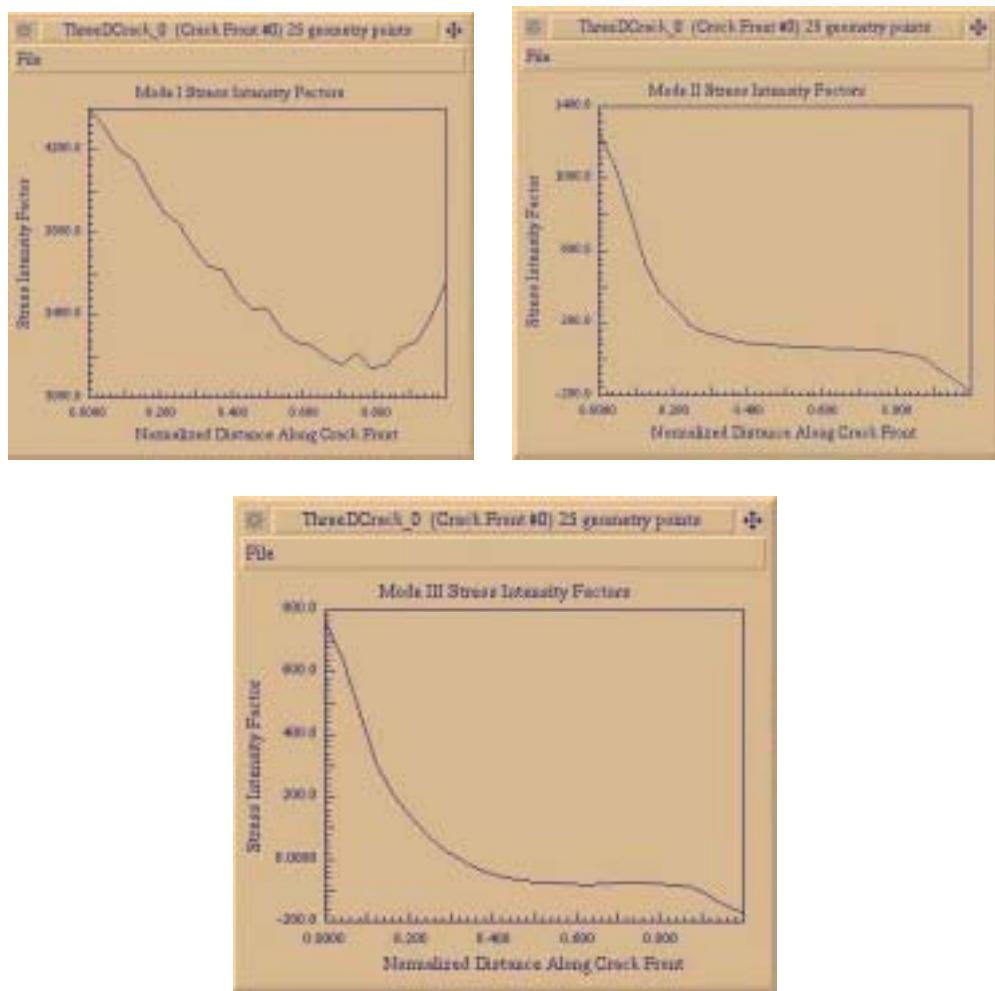


Figura 7. Fator de intensidade de tensões na frente da trinca.

- Conhecidos os resultados dos fatores de intensidade de tensão, pode-se realizar a propagação tridimensional da fissura. Pode-se observar que o valor significante do Modo II torna a fissura não-plana, Fig. (8).

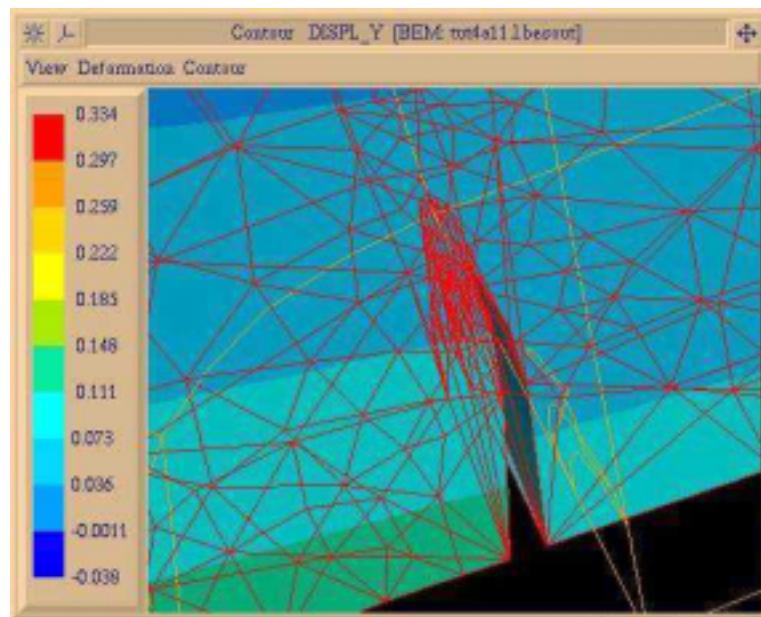


Figura 8. Propagação da fissura não-plana.

O segundo modelo estudado e em atual desenvolvimento é o corpo de prova compacto em tensão CT de material homogêneo da liga CA6NM, Fig. (9), sendo que se prefere estudá-la de forma completa sem tomar vantagem das condições de simetria, devido à futura colocação de cordões de solda na frente do entalhe. Para tal usa-se a mesma metodologia do primeiro modelo. Os resultados poderão ser validados com aqueles obtidos experimentalmente numa pesquisa anterior (Novicki, 2002).

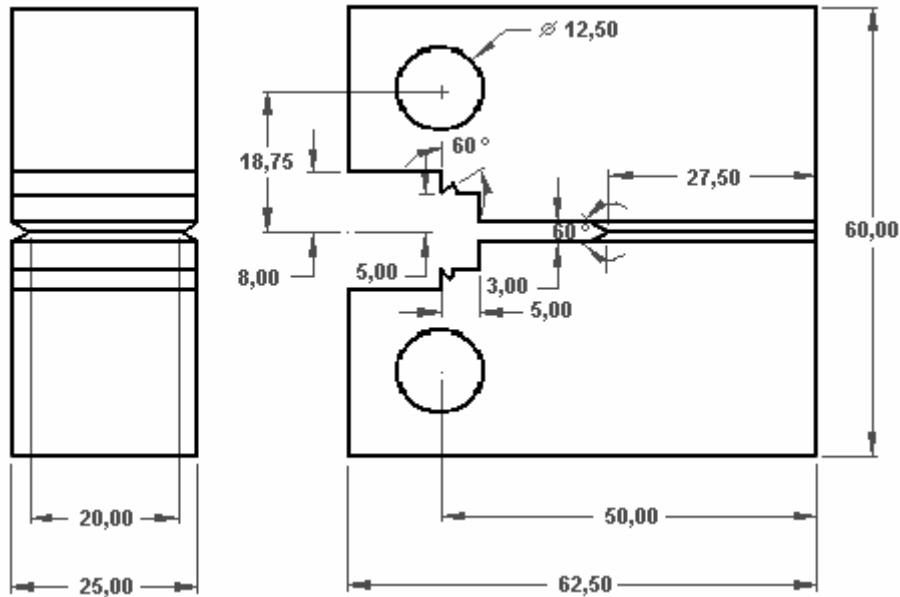


Figura 9. Dimensões do corpo-de-prova C(T) B x 2B. (Novicki, 2002)

A modelagem do corpo de prova CT para o trabalho de pesquisa apresenta algumas modificações, Fig. (10), se estando na fase de comprovação dos valores da análise de tensões, Fig. (11), e já se tendo alguns resultados preliminares de colocação de trinca para o cálculo do fator de intensidade de tensões na frente da trinca.

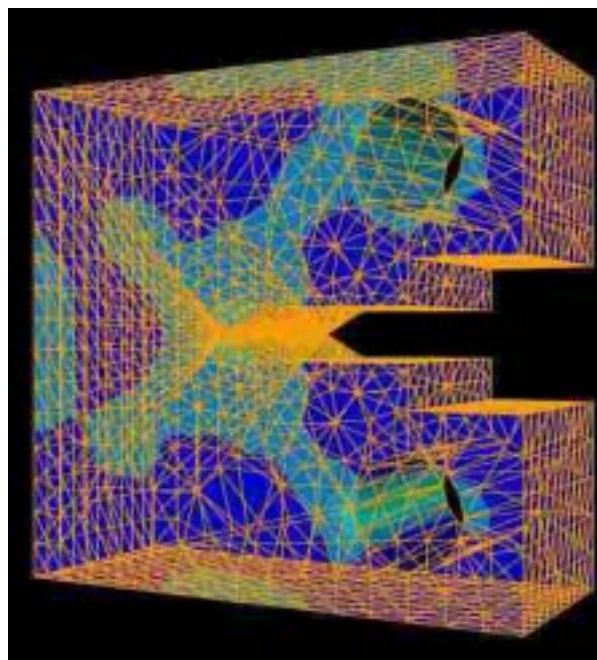


Figura 10. Malha de elementos de contorno do corpo de prova CT

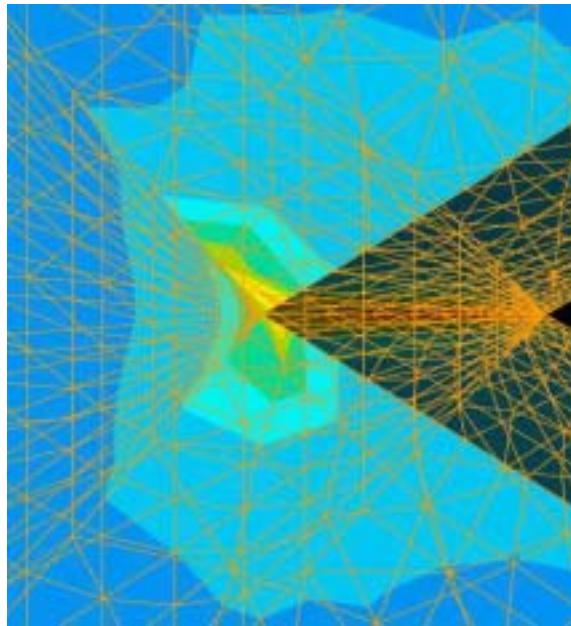


Figura 11. Detalhe da análise de tensões no entalhe do corpo de prova CT

#### 4. CONCLUSÕES

Existem diversas vantagens econômicas para usar ferramentas computacionais como possível substituto dos onerosos ensaios experimentais, mas deve-se ter plena ciência das limitações da simulação, o tempo de familiarização e principalmente considerar a fase de validação de resultados. Nesse sentido foram realizados treinamentos específicos para utilização do programa de simulação de fratura FRANC3D (Fracture Analysis Code); que, por ser um programa acadêmico orientado à pesquisa, ainda apresenta dificuldades de ajuda e suporte ao contrário dos programas comerciais. A limitação dos programas comerciais para trabalhar uniões soldadas justifica a utilização dessa plataforma acadêmica.

#### 5. AGRADECIMENTO

A execução desse trabalho conta com o suporte de bolsas de iniciação de pesquisa para graduação: BIC-UFRGS (R.R.) e PIBIC/CNPq-UFRGS (C.G.F.).

#### 6. REFERÊNCIAS

- Aliabadi M. H. and Rooke D. P., 1991, “Numerical Fracture Mechanics”, Kluwer Academic Publishers.
- Aliabadi, M. H. (ed.), 2001, “Nonlinear Fracture and Damage Mechanics”, WIT Press.
- Anderson, T. L., 1995, “Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications”, CRC Press, 2<sup>nd</sup> ed.
- Branco, C. M., 1986, “Fadiga de Estruturas Soldadas”, Fundação Calouste Kulbenkian, Lisboa.
- Franc3D, 1998, “Franc3D Documentation”, Franc3D Version 2, vol. I-II-III-IV-V.
- Moretti, C. O. e Bittencourt, T. N., 1998, “FRANC3D: Idéias Básicas, Conceitos Fundamentais e Utilização”, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, BT/PEF/9804.
- Novicki, N., 2002, “Caracterização da Tenacidade à Fratura do Aço Inoxidável Martensítico Macio CA6NM Temperado e Revenido em Juntas Soldadas sem TTPS”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia.

Sandera, P., Horníková, J. and Pokluda, J., 1998, "Effective Stress Intensity Factor of a Real-Like 3d Intergranular Crack Front", Proceedings of the Twelfth Biennial European Conference on Fracture, University of Sheffield, UK, September 14-18, 1998. EMASBOOKS: Structural Integrity Publications and Books. Books in the European Conference of Fracture (ECF) Series.

## THREE-DIMENSIONAL MODELING OF CRACKED STRUCTURES

**Walter Jesus Paucar Casas**

**Rafael Ramanzini**

**Clóvis Geordane Fernandes**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite 425, CEP 90050-170, Porto Alegre – RS, [walter.paucar.casas@ufrgs.br](mailto:walter.paucar.casas@ufrgs.br)

**Abstract.** *The computational treatment of cracked welded structures using principles of fracture mechanics is not sufficiently developed in specialized literature. In this context, there is need of an adequate computational platform for modeling three-dimensional cracked welded structures, with the final objective for using it in true structures. For this purpose, some available academic computational tools such as OSM, BES and FRANC3D are evaluated aiming at its possible use in complex structures. Diverse difficulties associates to the lack of specific literature for modeling welded structures, interface of the program and complexity of the problem, must be considered for testing this platform.*

**Keywords:** *boundary element method, cracks, fracture, fatigue.*