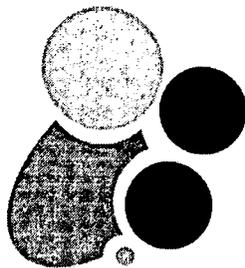


CILAMCE



Ouro Preto/MG - Brazil

2003

XXIV IBERIAN LATIN-AMERICAN
CONGRESS ON COMPUTATIONAL
METHODS IN ENGINEERING

ISBN Proceedings CD: 85-288-
0040-7

ISBN Book of Abstracts:
85-288-0041-5

ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS PARA A OBTENÇÃO DO
PARÂMETRO INTEGRAL J, ATRAVÉS DA ANÁLISE POR ELEMENTOS
FINITOS

Emerson Giovani Rabello

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CNEN/CDTN
Rua Professor Mário Werneck s/n – Caixa Postal 941 – Belo Horizonte – MG – Brasil
egr@cdtn.br

Julio Ricardo Barreto Cruz

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CNEN/CDTN
Rua Professor Mário Werneck s/n – Caixa Postal 941 – Belo Horizonte – MG – Brasil
jrbc@cdtn.br

Miguel Mattar Neto

Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares – CNEN/IPEN
Av. Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP 05508-900
mmattar@ipen.br

Carlos Alexandre de Jesus Miranda

Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares – CNEN/IPEN
Av. Prof. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP 05508-900
cmiranda@ipen.br

Abstract. O crescente desenvolvimento tecnológico e a melhoria dos recursos computacionais permitiram um avanço na utilização de análises numéricas aplicadas em estudos de mecânica da fratura e integridade estrutural. A análise por elementos finitos tem se tornado uma importante ferramenta para a determinação de parâmetros de tenacidade à fratura de materiais estruturais, permitindo esclarecer a influência de diversos fatores sobre a tenacidade dos materiais de uma forma menos onerosa.

Assim, através da modelagem numérica 2-D de um corpo-de-prova normalizado, tipo SENB (Dobramento em três pontos), foram realizadas análises numéricas por elementos finitos para a determinação do parâmetro Integral J em materiais estruturais, utilizando três metodologias distintas: Integral J pela definição de Rice, Método da Área e Método da Energia. Os resultados relativos à cada metodologia são comparados com os resultados obtidos pelo procedimento para estimativa de J desenvolvido pelo Electric Power Research Institute (Método EPRI).

Keywords: Tenacidade à fratura, Elementos finitos, Integral J.

9842

1. INTRODUÇÃO

A tenacidade à fratura é uma importante propriedade mecânica relacionada à capacidade de resistência de um material à propagação de trincas. Um dos principais parâmetros para a determinação dessa propriedade é a Integral J, definida por Rice (1968).

Algumas normas, como a ASTM E 1820-96 (1997), estabelecem as condições de ensaios para a determinação experimental da tenacidade à fratura de materiais estruturais. Entretanto, a realização desses ensaios torna-se muitas vezes difícil e onerosa, dependendo do número de corpos-de-prova a ser testado e das condições de carregamento e temperatura exigidos.

Assim, a melhoria dos recursos computacionais permitiu um avanço na utilização de análises numéricas aplicadas em estudos de mecânica da fratura, sendo que a análise por elementos finitos tem se tornado uma importante ferramenta para a determinação de parâmetros de tenacidade à fratura de materiais estruturais, permitindo esclarecer a influência de diversos fatores sobre a tenacidade dos materiais de uma forma menos onerosa.

Este trabalho constitui a etapa inicial de um projeto que pretende estudar a influência das geometrias de corpos-de-prova e de trincas sobre a tenacidade à fratura de aços utilizados na fabricação de vasos de pressão e reatores nucleares. Assim, nesta etapa pretende-se desenvolver métodos numéricos para a determinação do parâmetro Integral J e avaliar a aplicabilidade de tais métodos em estudos de mecânica da fratura.

Dessa forma, neste trabalho, foram realizadas análises numéricas por elementos finitos para a determinação do parâmetro Integral J em corpos-de-prova normalizados, tipo SENB (Dobramento em três pontos), utilizando três metodologias distintas: Integral J pela definição de Rice, Método da Área e Método da Energia. Os resultados relativos à cada metodologia são comparados com os resultados obtidos pelo procedimento para estimativa de J desenvolvido pelo Electric Power Research Institute (Método EPRI).

2. DETERMINAÇÃO DA INTEGRAL J

2.1 Integral J pela definição de Rice

A aplicação de integrais invariantes para caracterização do estado de tensões e deformações em um corpo contendo uma trinca foi proposta por Rice (1968). Em seu trabalho original, foi introduzida uma integral que representa a intensidade do trabalho mecânico na ponta da trinca.

Considerando um corpo contendo uma trinca ao longo do eixo x_1 (Fig.1), a Integral J pode ser definida por:

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dx_2 - p_i \frac{du_i}{dx_1} ds \right) \quad (1)$$

onde: Γ é um contorno simples em torno da ponta da trinca; ds é um elemento de contorno; $p_i = \sigma_{ij} n_{ij}$ são as componentes da força que representam a ação do domínio externo em relação ao contorno e a densidade de energia de deformação, w , é dada por:

$$w = w(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2)$$

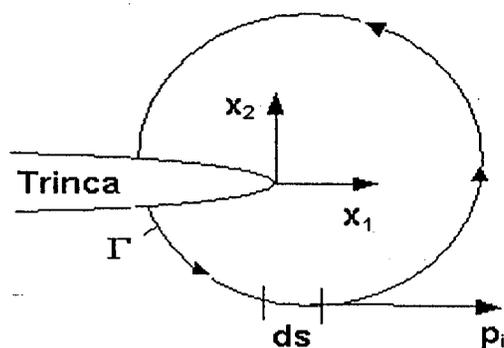


Figura 1 - Definição da Integral J, por Rice

2.2 Integral J pelo Método da Energia

Uma definição alternativa para a Integral J pode ser dada pela variação da energia potencial ocorrida no crescimento infinitesimal de uma trinca com comprimento inicial igual a a . Assim, para um corpo-de-prova com espessura B e um crescimento de trinca igual a da , a Integral J pode ser escrita em função da diferença de energia, dU .

$$J = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (3)$$

$$dU = \int (P_2 - P_1) d\Delta \quad (4)$$

onde, P_1 e P_2 são as cargas associadas aos tamanhos de trinca a e $a+da$, respectivamente, e $d\Delta$ é a variação da linha de carga no corpo-de-prova.

Dessa forma, pode-se chegar a uma forma aproximada para a Integral J para condições de pequenas deformações:

$$J \cong \frac{1}{BP} \frac{dP}{da} \int P d\Delta \quad (5)$$

Conhecendo-se portanto a energia associada em cada acréscimo de carga, pode-se determinar a diferença de energia entre os estados inicial e final de crescimento da trinca, e conseqüentemente, o valor da Integral J.

2.3 Integral J pelo Método da Área

Considerando a definição pela variação de energia potencial, pode-se assumir que a Integral J é proporcional à área (energia) sob a curva de carga vs. deslocamento da linha de carga, conforme mostrado na Fig. 2.

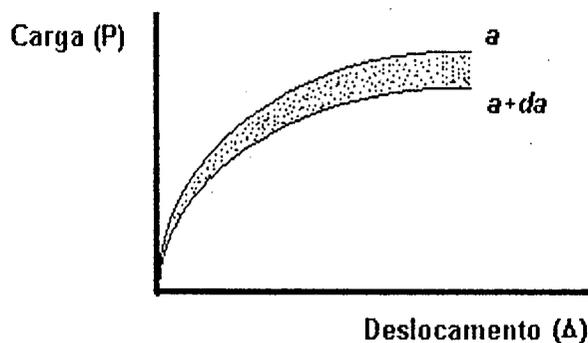


Figura 2 - Curvas Carga vs. Deslocamento para corpos-de-prova com comprimentos de trinca a e $a+da$

Assim, conhecidas as curvas mostradas na Fig.2 pode-se inferir a tenacidade à fratura do material através da aplicação de algoritmos puramente geométricos para o cálculo da diferença entre as áreas.

2.4 Integral J pelo Método EPRI

Anderson (1995) apresenta um método para estimativa da Integral J desenvolvido pelo Electric Power Research Institute (EPRI), para diversas configurações de corpos-de-prova. Por esse método a Integral J é dada pela soma das parcelas elástica e plástica, conforme Eq. 6.

$$J_{TOTAL} = J_{Elástico} + J_{Plástico} \quad (6)$$

$$J_{Elástico} = \frac{K_I^2(a_{eff})}{E'} \quad (7)$$

$$a_{eff} = a + \frac{1}{1 + (P/P_0)^2} \cdot \frac{1}{\beta\pi} \cdot \left(\frac{n-1}{n+1}\right) \cdot \left(\frac{K_I(a)}{\sigma_0}\right)^2 \quad (8)$$

$$J_{Plástico} = \alpha \cdot \epsilon_0 \cdot \sigma_0 \cdot b \cdot h_1 \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{n+1} \quad (9)$$

sendo:

K_I = Fator de intensidade de tensão (dependente da geometria do corpo-de-prova)

a_{eff} = Comprimento efetivo da trinca, considerando uma correção para a zona plástica

$$E' = \text{Módulo de Elasticidade} - E' = \begin{cases} E & (\text{Estado Plano de Tensão}) \\ \frac{E}{(1-\nu)^2} & (\text{Estado Plano de deformação}) \end{cases}$$

B = ligamento remanescente ($W - a$).

$$\beta = \text{Constante} - \beta = \begin{cases} 2 & (\text{Estado Plano de Tensão}) \\ 6 & (\text{Estado Plano de deformação}) \end{cases}$$

h_1 = Fator geométrico (dependente da relação a/W)

Os demais fatores são retirados da Equação de Ramberg-Osgood para o comportamento mecânico do material:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (10)$$

onde, n é o coeficiente de encruamento do material.

3. METODOLOGIA

A análise elasto-plástica por elementos finitos foi realizada utilizando como referência um corpo-de-prova tipo SENB (Dobramento em três pontos) padronizado, conforme a norma ASTM E1820-96 (1997), cujas principais dimensões são mostradas na Fig.3.

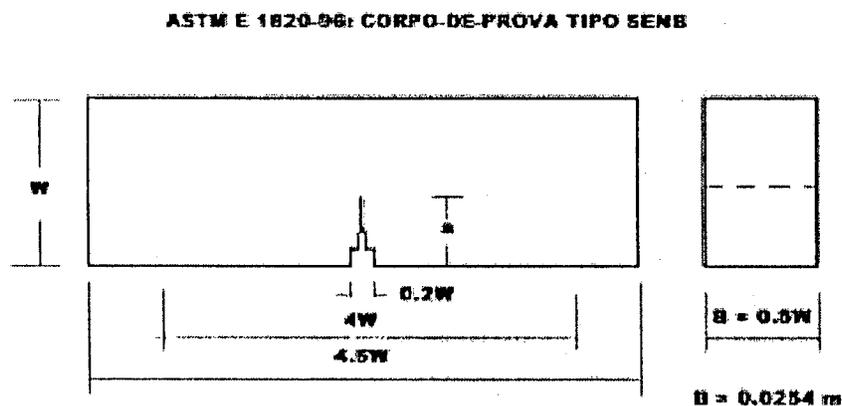


Figura 3 - Corpo-de-prova de referência

Partindo das dimensões do corpo-de-prova real, um modelo foi criado utilizando-se o pré - processador do programa para análise por elementos finitos ANSYS 5.7 (*PREP7*).

Aproveitando a simetria existente (Eixo - x), apenas metade do corpo-de-prova foi analisada. Uma malha refinada foi aplicada contendo 1196 elementos planos quadriláteros (*PLANE42*) e 1291 nós. Na Figura 4 são mostrados os detalhes do modelo. Os elementos planos utilizados foram criados assumindo a condição de Estado Plano de Deformação (EPD), devido a espessura de 0.0254 m.

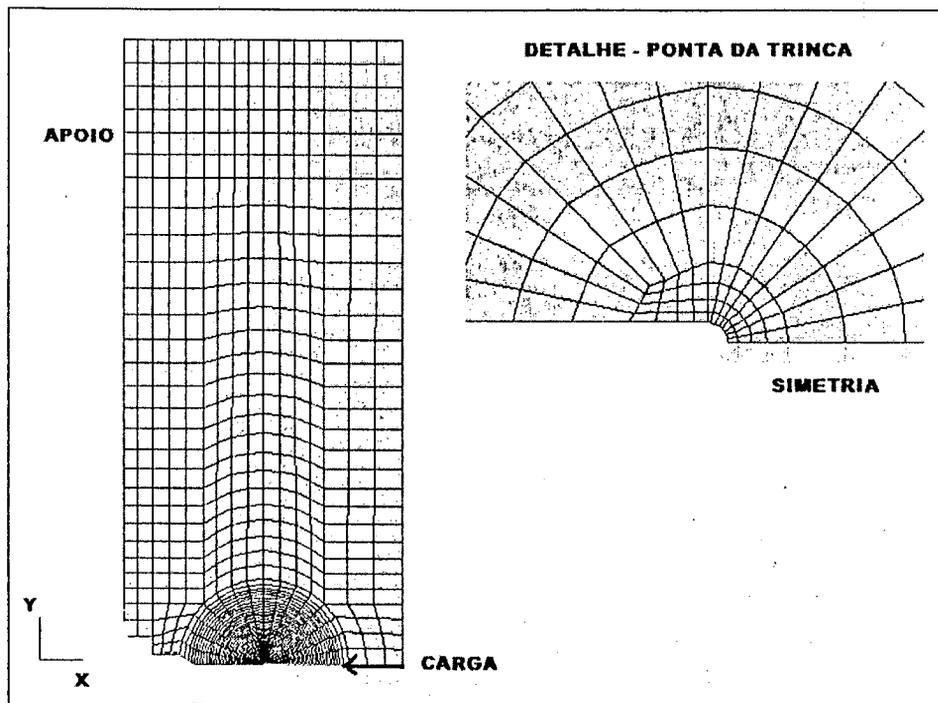


Figura 4 - Detalhes do modelo

O comportamento mecânico do material se baseou na teoria de pequenas deformações para o endurecimento isotrópico. Dessa forma, foi adotado o comportamento descrito pela Equação de Ramberg-Osgood, Eq. (10), sendo os seguintes parâmetros empregados: $\alpha = 1$; $E / \sigma_0 = 500$, $n = 5$ e $\nu = 0.3$.

O carregamento foi aplicado em 46 passos (Load Steps), conforme mostrado na Fig. 5.

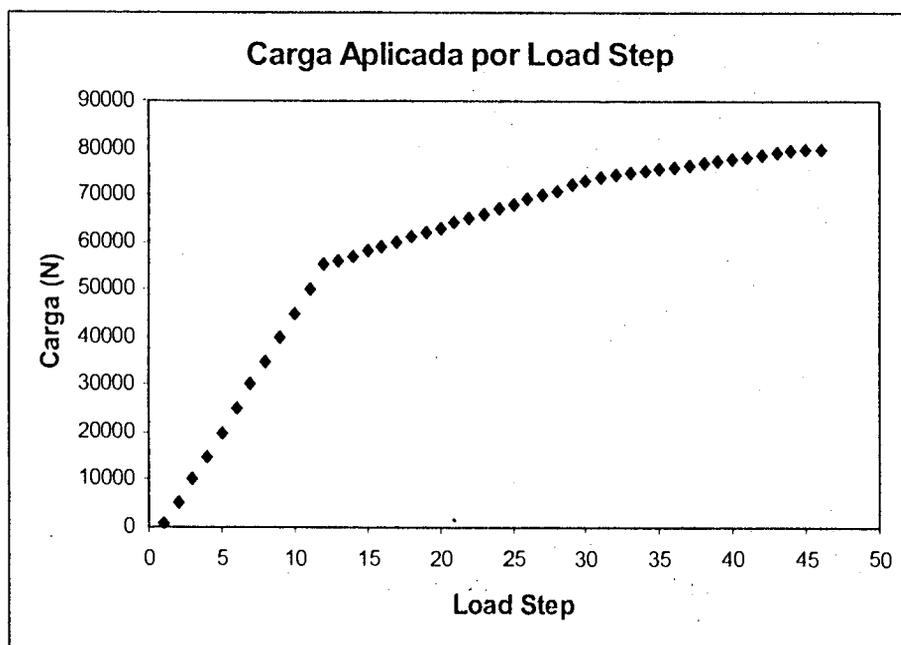


Figura 5 - Carga aplicada ao modelo

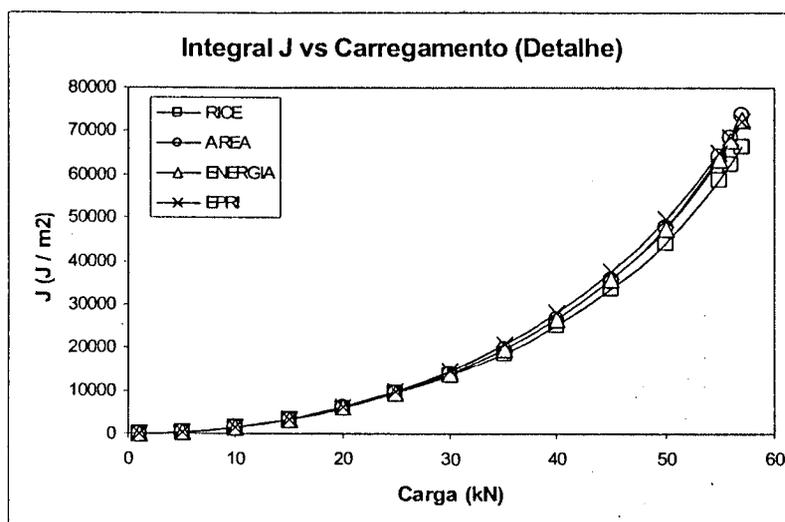


Figura 7 - Detalhe da comparação entre os resultados de cada método

Observando as Figs. 6 e 7 constata-se uma boa concordância entre os resultados obtidos por cada método utilizado na determinação da Integral J. Através da análise dos resultados numéricos, a diferença entre os valores obtidos pelo Método EPRI e os demais é de no máximo 3%, com exceção do Método Rice que apresentou uma diferença máxima de 11%.

A diferença constatada pode ter sido provocada pela interpolação automática que programa ANSYS 5.7 faz na curva do comportamento mecânico do material, que não segue fielmente a Equação de Ramberg-Osgood. No Caso do Método Rice, a escolha dos contornos ao redor da trinca pode ter influenciado na diferença dos resultados.

Tendo em vista que a variação dos valores da Integral J obtidos experimentalmente através da norma ASTM 1820-96 é da ordem de 5% a 9%, pode-se considerar que os métodos numéricos utilizados neste trabalho são satisfatórios.

5. CONCLUSÕES

A utilização da análise por elementos finitos é uma importante ferramenta aplicada aos estudos de mecânica da fratura, propiciando análises relativamente rápidas e confiáveis para a determinação de parâmetros relacionados à tenacidade à fratura dos materiais.

Dentre os métodos testados para a obtenção da Integral J pôde-se perceber uma diferença máxima da ordem de 3% em relação ao Método EPRI, que para fins práticos pode ser desconsiderada.

REFERÊNCIAS

- Anderson, T. L., 1995, Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications. Boca Raton: CRC Press, 793p.
- ASTM Standard test method for measurement of fracture toughness. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. ASTM E1820-96. 1997.
- Rice, J. R., 1968, A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, Journal of Applied Mechanics, vol. 35, pp. 379-386.
- Solecki, J. S., 1989, ANSYS Revision 4.4 Tutorial – Fracture Mechanics, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, USA.