



REPRESENTAÇÃO DO MODELO ETM NO DIAGRAMA FAD

Sergio Schneider

FAENQUIL-DEMAR, Pólo Urbo Industrial Gleba AI-6, CEP 12600-000, Lorena-SP, e-mail:
sergiosch@demar.faenquil.br

Hazim Ali Al-Qureshi

hazimail@yahoo.com

***Resumo.** Nesse trabalho desenvolve-se um procedimento analítico aplicado à análise de integridade estrutural. Os procedimentos permitem que os resultados sejam apresentados em termos das curvas de força motriz da trinca (CDF) ou pelo diagrama de análise de falhas (FAD). O trabalho é desenvolvido a partir do modelo ETM (Engineering Treatment Model), e as formulações desenvolvidas descrevem as condições de falhas em termos da Integral-J. Especial atenção é dada a um simplificado procedimento de representação do modelo ETM no diagrama FAD. Modificações são introduzidas considerando-se que as propriedades do material são bem representadas pela expressão constitutiva de Swift. Sendo assim, tanto o encruamento inicial (ϵ_0) quanto o coeficiente de encruamento (n) são parâmetros adicionais de análise de estruturas trincadas. As condições de instabilidade no diagrama FAD se baseiam na proposta apresentada no presente trabalho e comparadas com a metodologia R6 – revisão 3, opções 1 e 2. A partir das simulações e resultados obtidos, comprova-se a validade da metodologia proposta.*

***Palavras chaves:** mecânica da fratura, diagrama de análise de falhas, integridade estrutural, Integral-J.*

1. INTRODUÇÃO

O modelo ETM é um dos procedimentos existentes que propõe, entre outros, estimar a força motriz da trinca em termos de J, CTOD (δ_5) e do deslocamento da linha de carga, essencialmente na condição de estado plano de tensão (EPT), estando o material no regime de pequena escala de escoamento ou num regime completamente plástico, sendo que, a carga aplicada, deformação aplicada e os parâmetros de tenacidade são correlacionadas através de expressões simples, colocadas numa forma normalizada que eliminam a dependência da geometria e do tipo de corpo de prova. Dentro da metodologia do ETM, o CTOD se refere à definição experimental δ_5 , que mede, na superfície lateral do corpo de prova, a abertura na ponta da trinca, contada a partir de um comprimento do extensômetro de 5 mm (Schwalbe e Cornec, 1991 e Hellmann e Schwalbe, 1984). Experimentos realizados por Hellmann e Schwalbe (1984), mostraram que esse parâmetro δ_5 é muito apropriado para medir crescimento estável de trincas, admitindo-se comprimentos bem superiores que os permitidos para Integral-J na condição de J controlado por deformação. Ele é capaz correlacionar crescimento estável de trinca da ordem de 25% do ligamento original no caso do corpo de prova tipo CT e quase 100% em corpos de prova CCT. Apesar do parâmetro δ_5 se

apresentar como um parâmetro de análise bastante promissor, o enfoque principal no presente trabalho é voltado para a Integral-J. A Integral-J tem sido eficiente no acompanhamento e análises de integridade de estruturas devido a sua capacidade de correlacionar o crescimento estável de trincas tanto no regime elasto-plástico quanto no completamente plástico. O método permite prever condições de falhas em termos da iniciação do crescimento da trinca e de carga máxima, qualificando-o como um dos principais métodos de avaliação de integridade de estruturas trincadas. O método ETM foi inicialmente desenvolvido por Schwalbe (1984) na GKSS–Alemanha, utilizando-se corpos de prova do tipo CCT (*Center Cracked Tension*). Posteriormente, uma extensão do modelo foi desenvolvida Schwalbe (1987) para corpos de provas testados em configuração de flexão. Trata-se de um modelo relativamente recente de análise de integridade estrutural, sendo mais simples e mais flexível que o método EPRI desenvolvido por Kumar et al (1981). Além dos cálculos associados ao fator intensidade de tensão (K), somente dados da curva tensão-deformação são necessários.

Trabalhos recentes (Ainsworth, 2000, Laukkanen, 2000, Schwalbe, 2000) descrevem a representação do modelo ETM através do diagrama FAD. Vale destacar a utilização de conceitos do modelo ETM como parte integrante do projeto SINTAP (European Project Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry), concluído em 1999, cujos procedimentos permitem a avaliação de integridade estrutural com a representação dos resultados tanto em termos de diagrama FAD quanto no diagrama de força motriz da trinca. As formulações desenvolvidas no projeto SINTAP são baseadas tanto no modelo ETM quanto no método R6-Rev.3, sendo que, as pequenas modificações introduzidas foram feitas com o objetivo de se ter um único conjunto de equações adequadas aos níveis de análises que foram propostos. Ainsworth et al (2000) mostraram que existem sete níveis de análises no procedimento SINTAP que, em ordem crescente, requerem informações adicionais ou mais completas que aumentam a precisão nos resultados e diminuem o conservadorismo. No presente trabalho somente algumas formulações e conceitos referentes aos níveis 1 e 3 serão objetos de análise.

A proposta fundamental do presente trabalho é incorporar ao modelo ETM existente, parâmetros associados ao comportamento mecânico do material descrito pela equação de Swift ($\mathbf{s} = A(\mathbf{e}_0 + \mathbf{e}_t)^n$). Com isso, tanto o coeficiente de encruamento quanto o encruamento inicial passam a ser objetos de análise e investigação de integridade estrutural, utilizando como parâmetro de tenacidade a Integral J. Além da possibilidade de análise através das curvas de força motriz, as modificações introduzidas permitem a representação do modelo proposto através do diagrama FAD, e são comparadas com a metodologia R6-Rev. 3, opções 1 e 2.

2. FORMULAÇÕES BÁSICAS

2.1. Curvas de Força Motriz

Na versão original, o comportamento do material pode ser representado pela lei de potência parcial:

$$\mathbf{s} = \mathbf{s}_y \left(\frac{\mathbf{e}}{\mathbf{e}_y} \right)^n \quad (\mathbf{s} > \mathbf{s}_y) \quad (1)$$

$$\mathbf{s}_y = \mathbf{s}_{0,2}$$

Na região de plasticidade restrita utilizam-se os conceitos da MFEL (Mecânica da Fratura Elástica Linear) com correção da zona plástica proposta por Irwin. Na forma completamente plástica as propriedades do material, obtidas pela curva tensão-deformação, são relacionadas com a força motriz da trinca. O modelo original considera a curva tensão-deformação convencional da engenharia do material de interesse para definir a tensão de escoamento (σ_y), normalmente $\sigma_{0,2}$. Após determinar a tensão de escoamento $\sigma_{0,2}$, a curva tensão deformação é aproximada por uma

reta entre os dois pontos de coordenadas, na escala logarítmica: $(\epsilon_{0,2}, \sigma_{0,2})$ e (ϵ_m, σ_m) , e a inclinação da reta representa o coeficiente de encruamento n . Esses valores são colocados numa forma normalizada $(\sigma/\sigma_y) - (\epsilon/\epsilon_y)$. Na condição, completamente plástica, o modelo ETM relaciona esses pontos lineares trocando (σ/σ_y) por (F/F_y) e (ϵ/ϵ_y) por $(J/J_y)^{1/n}$, resultando nas seguintes relações proposta por Schwalbe e Cornec (1991):

$$\left[\frac{F}{F_y} \right]^{1/n} = \left[\frac{e}{e_y} \right] = \left[\frac{J}{J_y} \right]^{1/(1+n)} = \left[\frac{d_5}{d_{5y}} \right] \quad (2)$$

em que: F é a carga aplicada, F_y é a carga de escoamento na seção do ligamento, J é a Integral J , J_y é a Integral J avaliada em F_y , e é a deformação aplicada e e_y é a deformação de escoamento.

Resumidamente, o modelo ETM faz uso de pontos de referência tais como σ_y , ϵ_y ou F_y abaixo da qual se aplicam os conceitos da MFEL com plasticidade corrigida e acima da qual a força motriz da trinca é amplificada num trecho completamente plástico, por um fator de escalonamento baseado no coeficiente de encruamento (n) do material. Um importante passo na aplicação do modelo ETM é a representação da curva tensão-deformação do material. A definição de uma tensão de fluxo e do coeficiente de encruamento é um ponto crucial nesse modelo. Além da tensão de fluxo ser um ponto que delimita duas regiões distintas, ou seja, escoamento restrito e plastificação total (completamente plástico), o coeficiente de encruamento é usado no escalonamento de dados dentro da região de plastificação total.

2.2. Diagrama de Análise de Falha (FAD) - Método R6

O método R6 de avaliação de integridade estrutural foi originalmente proposto por Harrison et al (1976), e publicado pela CEGB (Central Electricity Generating Board) no Reino Unido. Essa metodologia introduziu o conceito de Diagrama de Análise de Falha (*Failure Assessment Diagrams*-FAD) para estabelecer a condição de estabilidade (região segura) numa estrutura carregada contendo defeito como trinca. O FAD estabelece uma curva de transição entre dois extremos: uma região onde a fratura é frágil e predomina o estudo da MFLE, e outra região onde a fratura ocorre por colapso plástico governado pela carga limite. Esse modelo tem se mostrado bastante versátil e de fácil aplicação.

Os avanços da Mecânica da Fratura, após a implantação do método R6, particularmente no desenvolvimento das soluções de J na condição completamente plástica, permitiram melhoramentos no procedimento R6. Esses avanços foram incorporados ao método R6, permitindo que o FAD represente mais precisamente as características de diferentes materiais. No presente trabalho utiliza-se a documentação R6 na sua terceira revisão, R6-Rev.3, e publicada por Milne et al (1986), especificamente as opções 1 e 2. Segundo a metodologia R6 revisão 3 as coordenadas do diagrama FAD são expressas da seguinte forma:

Opção 1: Esta opção é apropriada quando não se têm dados relevantes referentes à curva tensão-deformação do material. O valor de K_r é considerado como sendo conservativo (*lower bound*), e o diagrama FAD é definido pela equação:

$$K_r = \left(1 - 0,14L_r^2 \right) \left(0,3 + 0,7 \exp(-0,65L_r^6) \right) \quad (3)$$

sendo que:

$$L_r = \frac{S_{ref}}{S_y} = \frac{F}{F_y} \quad (4)$$

em que: σ_{ref} é a tensão de referência e σ_y é a tensão de escoamento

Opção 2: utiliza o conceito de tensão e deformação de referência, e é desenvolvida principalmente para suprir a necessidade de representar mais precisamente o comportamento de certos materiais que não são bem representados pela lei de Ramberg-Osgood (R-O). O valor de K_r é dado por:

$$K_r = \left(\frac{Ee_{ref}}{L_r s_y} + \frac{L_r^3 s_y}{2Ee_{ref}} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

em que: $(\epsilon_{ref}, \sigma_{ref})$ são pontos de coordenadas do material na curva tensão-deformação verdadeira.

3. MODELO PROPOSTO

3.1. Diagrama de Força Motriz

O modelo original ETM publicado por Schwalbe e Cornec (1991) representa o comportamento do material através de uma lei de potência e se baseia na curva tensão-deformação convencional para determinar o coeficiente de encruamento, e a tensão de fluxo se baseia sempre na tensão de escoamento, normalmente $\sigma_{0,2}$. Entretanto, nem sempre o comportamento do material pode ser adequadamente representado da forma proposta originalmente, e a tensão de fluxo e o coeficiente de encruamento, passam a ser definidos segundo critérios desenvolvidos no aprimoramento desse modelo. Dentre essas e outras características que se apresentam na curva tensão-deformação do material, o modelo ETM tem caminhado no sentido de aprimorar seus conceitos e formulações, tornando-o mais abrangente a diversos materiais. Ressalta-se que o coeficiente de encruamento (n) definido no presente trabalho difere do modelo original. Enquanto que no modelo original utiliza a curva tensão-deformação convencional para definir o coeficiente de encruamento, no presente trabalho o coeficiente de encruamento é aquele que melhor ajusta os pontos experimentais através do método dos mínimos quadrados, e utiliza dados da curva tensão-deformação verdadeira. Outro ponto a se destacar é a introdução do encruamento inicial (ϵ_0) na avaliação da Integral-J dentro do trecho completamente plástico. O encruamento inicial (ϵ_0) representa o estado mecânico-metalúrgico inicial do material, sendo constatado no desenvolvimento do presente trabalho sua influência na determinação da Integral-J.

A definição de um coeficiente de encruamento, de acordo com o modelo original, é feita segundo vários critérios: tipo de corpo de prova, trecho, inclinação média, etc. No entanto, no presente trabalho o coeficiente de encruamento é aquele unicamente fornecido pela equação de Swift. Adotando-se esse procedimento verificou-se que o expoente usado no escalonamento de dados, que é função do coeficiente de encruamento, torna-se dependente de um fator característico do material (S) para representar adequadamente as relações existentes no trecho completamente plástico. Verificou-se que esse fator (S) depende da relação entre o encruamento inicial (ϵ_0) e a deformação no escoamento ($\epsilon_{0,2}$) da seguinte forma:

$$S = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_{0,2}} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (6)$$

O parâmetro S pode ser interpretado como um fator de identificação do estado mecânico-metalúrgico inicial que pode ser associado ao expoente de escalonamento no trecho completamente plástico, como representado esquematicamente na figura 1. O expoente de escalonamento no trecho completamente plástico ($S(n+1/n)$), é definido a partir das propriedades plásticas do material com base na representação do comportamento do material pela lei constitutiva de Swift. O modelo proposto torna-se representativa a todos os materiais cujos comportamentos são descritos pela equação de Swift.

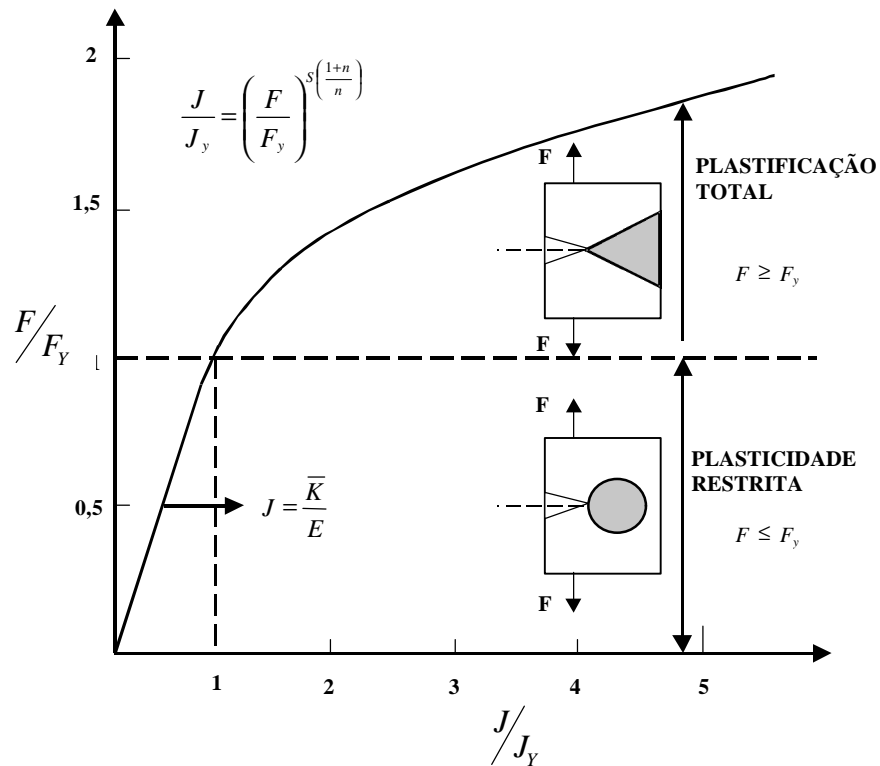


Figura 1. Determinação da Integral-J na condição de plasticidade restrita e completamente plástica.

Em escala logarítmica, o expoente de escalonamento (inclinação da reta), foi definido com base na sua capacidade de correlacionar adequadamente os termos normalizados no regime completamente plástico. Essa averiguação foi feita inicialmente analisando-se dados da literatura, descritos em uma série de publicações a respeito do modelo ETM (Schwalbe et al, 1992, 1996, 1991). A aplicabilidade do expoente de escalonamento, assumida no presente trabalho, pode ser constatada ao analisarmos os dados mostrados na Tab. (1), que apresenta uma comparação desse expoente entre a metodologia ETM, já validada experimentalmente, e a que está sendo assumida no presente trabalho.

Tabela 1. Comparação do expoente de escalonamento entre modelo proposto e ETM

MATERIAL	METODOLOGIA ETM		PRESENTE TRABALHO	
	n	EXPOENTE DE ESCALONAMENTO	n	EXPOENTE DE ESCALONAMENTO
		$\frac{n+1}{n}$		$\left(\frac{e_0}{e_{0,2}} \right)^{\frac{n}{n+1}} \frac{n+1}{n}$
Aço Inox X6CrNi1811	0,19	6,263	0,49	6,264
Aço Inox 316L mod.	0,15	7,666	0,556	7,663
Aço 20MnMoNi	0,12	9,333	0,126	9,477

Analisando a Tabela 1 podemos observar que os valores dos expoentes de escalonamento são praticamente iguais. A diferença máxima entre os modelos foi percebida no Aço 20MnMoNi.

Mesmo assim, essa diferença foi inferior a 2 %. Esse material apresentou patamar de escoamento, e isso representou um maior desvio dos dados experimentais ao ajustarmos o comportamento do material pela equação de Swift.

Curvas de força motriz de acordo com o modelo proposto foram verificadas experimentalmente por Schneider (2001). No presente trabalho a representação através da curva FAD é feita utilizando o aço inox X6CrNi1811. Para isso, utilizaram-se resultados experimentais, referentes a esse material, de diversos trabalhos (Schwalbe et al, 1991,1992, Cornec et al, 1994), que comprovam um comportamento característico para essa classe de materiais, apresentando dupla inclinação na região plástica. A Figura (2) mostra o comportamento em tração representado pela equação de Swift Schneider (2001).

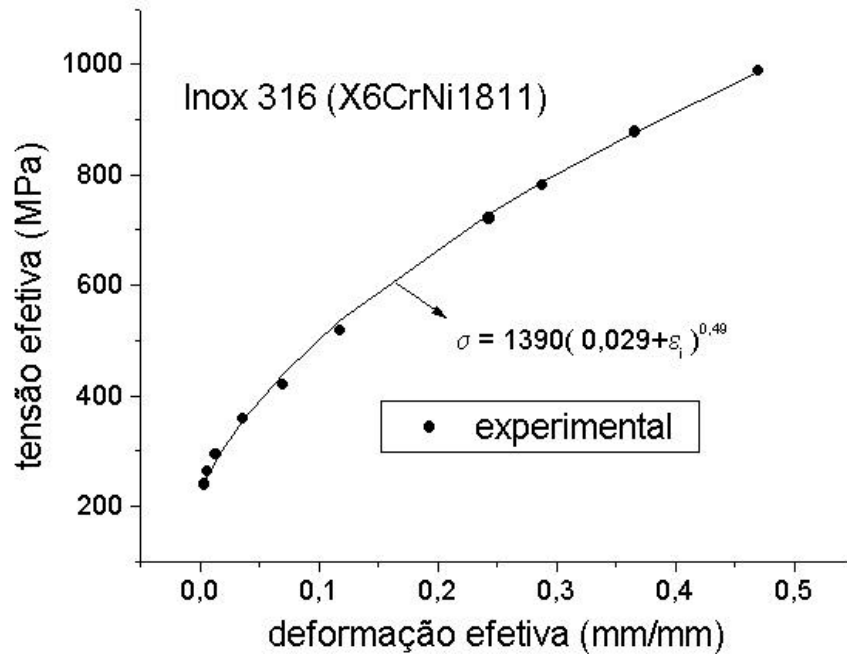


Figura 2. Curva constitutiva de Swift da liga X6CrNi1811

3.2. Diagrama FAD

A presente seção apresenta um procedimento alternativo para representar o modelo ETM no diagrama FAD, considerando-se as formulações e parâmetros definidos assumindo o comportamento do material segundo a lei de Swift. São assumidos alguns conceitos e procedimentos descritos no projeto SINTAP, níveis 1 e 3 descritos por Ainsworth et al (2000), bem como aqueles descritos por Laukkanem (2000), que tratam da representação do modelo ETM no diagrama FAD com base no modelo original.

O conceito de L_r é considerado similar à relação entre as cargas e calculado de acordo com a Eq. 4. Considerando que o material não apresenta patamar de escoamento, tem-se para $L_r \leq 1$:

$$K_r = \left(1 + \frac{1}{2} L_r^2\right)^{-1/2} \left[0,3 + 0,7 \exp(-0,6 L_r^6)\right] \quad (7)$$

Para $L_r > 1$ tem-se que L_r varia na forma $[L_r]^{s(1+n/n)}$, logo, a parte plástica em termos de J pode ser escrita como:

$$\frac{J}{J_y} = \left(\frac{F}{F_y}\right)^{s\left(\frac{1+n}{n}\right)} = (L_r)^{s(1+n/n)} \quad (8)$$

A relação entre os valores de J pode ser representada pela seguinte expressão proposta por Laukkanem (2000):

$$\frac{J}{J_y} = \frac{L_r^2}{K_r^2} K_r^2 \Big|_{L_r=1} \quad (9)$$

A Equação (9) pode ser usada no escalonamento de L_r , usando as relações definidas na equação (8), ou seja:

$$K_r^2 = \frac{L_r^2}{L_r^{S(n+1)/n}} K_r^2 \Big|_{L_r=1} \quad (10)$$

que resulta na equação:

$$K_r = L_r^{1-S \frac{(n+1)}{2n}} K_r \Big|_{L_r=1} \quad \text{para } L_r > 1 \quad (11)$$

A função da Eq. (11) é aplicada no intervalo $1 < L_r \leq L_{r(\max)}$, sendo que, em vários trabalhos (Ainsworth et al, 2000, Zerbst et al, 2000) $L_{r(\max)}$ é definido no limite do colapso plástico pela seguinte relação:

$$L_{r(\max)} = 0,5 \left[\frac{\sigma_{el} + \sigma_m}{\sigma_{el}} \right] \quad (12)$$

em que: σ_{el} e σ_m são, respectivamente, o limite elástico e limite de resistência no ensaio de tração convencional.

O nível 3 do projeto SINTAP é idêntico à opção 2 do procedimento R6-Rev.3, em todo o intervalo $0 \leq L_r \leq L_{r(\max)}$, ou seja, utiliza-se a Eq. (5), o que demanda a curva tensão-deformação completa do material. É importante destacar o aumento crescente da quantidade de informações, e precisão na análise de falhas, na ordem crescente do nível de análise. Isso possibilita uma verificação no nível de precisão alcançado pelo modelo proposto quando comparado ao nível 3.

4. REPRESENTAÇÃO NO DIAGRAMA FAD

A figura (3) mostra a representação do diagrama FAD para o aço inox X6CrNi1811 considerando três metodologias independentes, sendo que, todas têm em comum a definição do limite de colapso plástico $L_{r(\max)}$ de acordo com a Eq. (12), e as demais condições de falhas pelos seguintes procedimentos:

- **R6-rev.3-Opção 1.** A Equação (3) foi usada para traçar a função K_r referente a opção 1 do procedimento R6 em todo intervalo: $0 \leq L_r \leq L_{r(\max)}$.
- **R6-rev.3-Opção 2.** A Equação (5) foi usada na opção 2 também no intervalo: $0 \leq L_r \leq L_{r(\max)}$. Vale lembrar que nessa opção a função K_r é avaliada com base nos dados da curva tensão-deformação do material. Os dados de tensão e deformação de referência, para os diversos pontos calculados, foram obtidos da curva tensão-deformação verdadeira mostrada no trabalho de Cornec et al (1994). Outras propriedades do ensaio de tração convencional de aplicação no presente trabalho estudo foram: $\sigma_y = \sigma_{0,2} = 239$ MPa; $\sigma_m = 617$ MPa e $E = 195$ GPa.
- **Modelo Proposto.** Nesse caso foram usadas duas equações: Eq. (6) para calcular K_r no intervalo: $0 \leq L_r \leq 1$, em que, esse intervalo representa a condição de plasticidade restrita; a Eq. (11) para $L_r > 1$ que caracteriza o regime completamente plástico de acordo com os parâmetros propostos no presente trabalho: $n = 0,49$; $\epsilon_0 = 0,49$; $\epsilon_{0,2} = 0,00322$, $S = 2,06$.

Pode-se notar no diagrama da Fig. (3) uma considerável semelhança para os três casos avaliados, principalmente entre o modelo proposto e a opção 2. A própria opção 1, conhecida como uma opção conservativa, e particularmente útil à materiais austeníticos, pode ser considerada representativa a esse material com relativa precisão. Apesar das formulações usadas no modelo proposto estarem mais diretamente relacionadas ao nível 1 de análise do projeto SINTAP, os resultados apresentados foram praticamente idênticos aos obtidos pela opção 2 ou nível 3 do projeto SINTAP. Isso representa um salto de qualidade ou mesmo de precisão na escolha do modelo proposto.

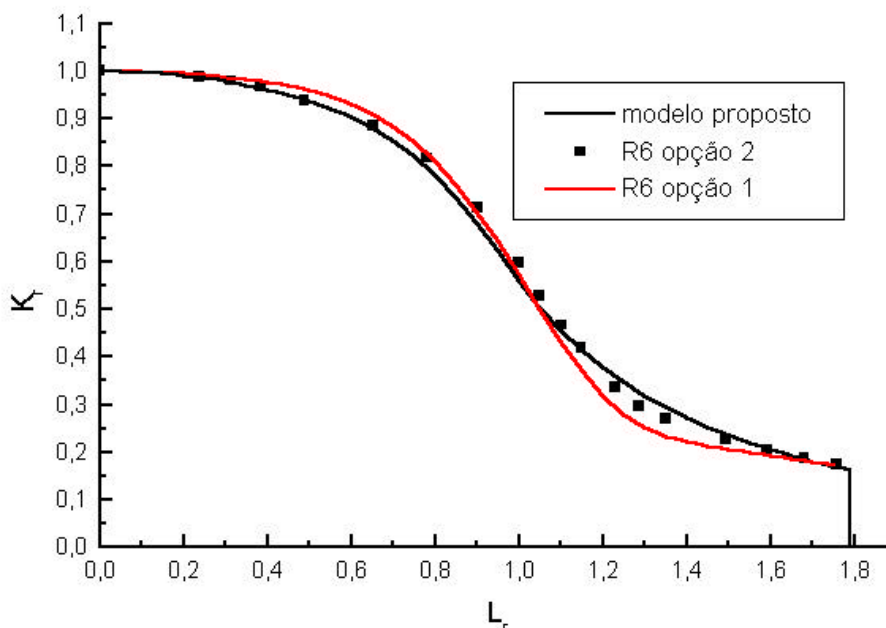


Figura 3. Representação do inox X6CrNi1811 no diagrama FAD de acordo com o modelo proposto e comparação com o procedimento R6 opções 1 e 2.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi introduzido um parâmetro adicional de análise, denominado parâmetro S, que pode ser adaptado ao modelo ETM de avaliação de integridade estrutural, quando a escolha do ajuste do comportamento em tração do material é feito pela lei de Swift. Nesse caso, tanto o encruamento inicial (ϵ_0) quanto o coeficiente de encruamento (n) foram à base de cálculo do expoente de escalonamento, e assumem uma importância fundamental na extrapolação de dados na região completamente plástica. As equações apresentadas possibilitam a análise de integridade pelas curvas de força motriz da trinca e/ou diagrama FAD, e são compatíveis.

A curva tensão deformação do material estudado, por exemplo, apresenta um comportamento com dupla-inclinação na região plástica, com mais de um coeficiente de encruamento, e sujeito a regras de definição de um coeficiente de encruamento, citadas no modelo ETM. No entanto, a representação do comportamento em tração do material pela lei de Swift define apenas um coeficiente de encruamento. Sendo assim, além de ser aplicável a materiais com dupla inclinação na região plástica, o modelo proposto também se aplica a materiais representados por uma lei de potência parcial quando $S=1$.

A representação do modelo no diagrama FAD mostrou um comportamento bastante parecido com o nível 3 do projeto SINTAP ou opção 2 do procedimento R6. Esses resultados preliminares mostram que o modelo proposto pode ser um método alternativo simples de análise de estruturas trincadas, num grau de precisão compatível com o nível 3 do projeto SINTAP.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ainsworth, R.A., Gutierrez-Solana, F. and Ocejó, J.R., 2000, "Analysis levels within the SINTAP defect assessment procedures", *Engineering Fracture Mechanics*, V. 67, pp.515-527.
- Cornec, A.; Lin, G.; Schwalbe, K.-H., 1994, "3D Study On An Austenitic Stainless Steel for Verification The Engineering Treatment Model (ETM)", In: Biennial European Conference on Fracture-ECF 10 – Structural Integrity: Experiments, Models and Applications, 1994, Berlin *Proceedings...*London: EMAS, pp.747-753.
- Harrison, R.P.; Loosemore, K. ; Milne, I. , 1976, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", London: Central Electricity Generating Board –CEGB. CEGB report R/H/R6.
- Hellmann, D. and Schwalbe, K.-H., 1984, "Geometry and Size Effects on J_R e δ_R Curves Under Plate Stress Conditions", *ASTM STP 833*, pp.577-605.
- Kumar, V.; German, M.D. and Shih, C.F., 1981, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis", Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute,. EPRI Report NP-1931.
- Laukkanen, A., 2000, "The Engineering Treatment Model and comparison to R6 revision3", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67, pp.367-380.
- Milne, I.; Ainsworth, R.H.; Dowling, AR.; Stewart, A.T., 1986, " Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects", London: Central Electricity Generating Board –CEGB, CEGB report R/H/R6-Rev.3.
- Schneider, S., 2001, "Análise de Estabilidade de Estruturas Trincadas via Integral-J Aplicada a Materiais Anisotrópicos Encruados", Tese de Doutorado, ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica.
- Schwalbe, K.-H., 1984, "A Simple Engineering Tr of Center Cracked Tension Panels in the Regime of Non-Linear fracture Mechanics Under Plane Stress Conditions", Geesthacht: GKSS-Research Center, Max-Plank, Report GKSS 84/E/38, 54p.
- Schwalbe, K.-H., 1987, "Extension of the Engineering Treatment Model (ETM) to Bending Configurations Under Plane Stress", Geesthacht: GKSS-Research Center, Max-Plank, Report GKSS 87/E/51, 36p.
- Schwalbe, K.-H. and Cornec, A., 1991, "The Engineering Treatment Model (ETM) and Its Practical Applications", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* , Vol. 14, n. 4, pp.405-412.
- Schwalbe, K.-H.; Cornec, A ; Heerens, J.,1991, "The Engineering Treatment Model (ETM) - a Simple Method for Estimating the Driving Force under elastic-Plastic and Plane Stress Conditions", *ESIS/EGF9 (Defects Assessment in Components - Fundamentals and Applications)*, Edited by J.G. Blauel and K.-H. Schwalbe, London: Mechanical Engineering publications, pp.1111-1124.
- Schwalbe, K.-H.; Grüter, ludwig., , 1992, "Ductile Crack Growth Under Plane Stress Conditions: Size Effects and Structural Assessment-II. Assessment of Circunferential Through-Cracks in Austenitic Stell Pipes Using The δ_5 Technique and Engineering Treatment Model". *Engineering Fracture Mechanics*, v. 42, n. 2, p. 221-235.
- Schwalbe, K.-H.; Cornec, A. ; Baustian, K., , 1996, "Application of Fracture Mechanics Principles to Austenitic Steels", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 65, p193-207.
- Schwalbe, K.-H, Zerbst, U., 2000, " The Engineering Treatment Model", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, V. 77, pp. 905-918.
- Zerbst, U., Ainsworth, R.A. and Schwalbe, K.-H., 2000, "Basic principles of analytical flaw assessment methods", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, V. 77, pp. 855-867.

Failure Assessment Diagrams Applied to ETM Method

Sergio Schneider

FAENQUIL-DEMAR, Pólo Urbo Industrial Gleba AI-6, CEP 12600-000, Lorena-SP, e-mail: sergiosch@demar.faenquil.br

Hazim Ali Al-Qureshi

hazimail@yahoo.com

***Abstract.** An analytical procedure applied to failure investigation is developed in this work. The procedures allows the results to be presented in terms of either a failure assessment diagrams (FAD) or a crack driving force (CDF). The work is conducted from the ETM (Engineering Treatment Model) scheme and the developed formulations describe the failure assessment behavior in terms of the J-Integral. Special attention is given to the simplified procedure by means FAD's representation applied to the ETM method. Some changes are introduced considering that the material's properties are well described by Swift's constitutive equation. Thus, both the residual strain hardening (ϵ_0) and strain hardening exponent (n) becomes an additional parameters for the integrity analysis of the cracked structure. The instability conditions are calculated by means of the model proposed in the present work and compared to those obtained through the R6-revision 3 methodology, options 1 and 2. From the simulations and obtained results, the validity of the proposed methodology is confirmed.*

***Keywords.** Fracture Mechanics, Failure Assessment Diagrams, Structural Integrity, J-Integral.*