

# DISTÂNCIAS DOS ELOS-MAIS-FRACOS ATÉ A PONTA DA TRINCA – ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

Carlos Alexandre de J. Miranda \*

\* IPEN-CNEN/SP  
Travessa R, 400  
05508-900, S. Paulo, SP, Brasil.  
e-mail: cmiranda@net.ipen.br

## RESUMO

Para os aços ferríticos não é possível determinar um valor de tenacidade à fratura,  $J_c$ , único que caracterize o estado de tensões na ponta da trinca, na região de *transição*. A previsão de  $J_c$ , ou: a transferência dos valores medidos com corpos-de-prova padronizados para as estruturas reais, é dificultada pela grande variação dos valores experimentais. Entre as abordagens existentes para a previsão de  $J_c$  destacam-se métodos estatísticos (Curva Mestra e Temperatura de Referência) e métodos determinísticos. Entre estes, tem-se a metodologia para previsão de  $J_c$  que utiliza a teoria de dois parâmetros J-Q e o conceito de elo-mais-fraco com a sua distância  $r_{wl}$  característica. Este trabalho experimental envolveu ensaios em 4 temperaturas, na *transição*, de 63 corpos-de-prova de mecânica da fratura, aço A508 classe 3, em três geometrias com espessuras  $B < 1T = 25,4$  mm. Após os ensaios para medir  $J_c$ , as superfícies dos corpos-de-prova foram observadas através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) para identificar os pontos de início da clivagem (elos-mais-fracos) e medir as suas distâncias  $r_{wl}$  até a ponta da trinca. Os resultados são discutidos e apresentados em termos das fractografias e dos valores  $r_{wl}$  medidos e teóricos.

**Palavras-chave:** Mecânica da Fratura, Resultados Experimentais, Transição, Fractografia, Elo-mais-Fraco

## I. INTRODUÇÃO

A variação dos valores medidos de tenacidade à clivagem ( $J_c$  ou  $K_{Ic}$ ) na região de transição dos aços ferríticos impede a determinação de um valor característico e, assim, dificulta a transferência dos valores medidos com corpos-de-prova padronizados para as estruturas reais. A dispersão aumenta com a temperatura e com a redução do tamanho dos corpos-de-prova.

Nesta região, quando o campo de tensões supera um certo valor crítico do material, a tensão de clivagem,  $\sigma_c$ , em um ponto à frente da trinca (elo-mais-fraco), ocorre a clivagem. No patamar inferior a ruptura também ocorre por clivagem mas com outro mecanismo disparador. Este tipo de fratura apresenta uma superfície típica, identificável por ser

diferente da superfície de fratura por fadiga ou por rasgamento dúctil (patamar superior).

A distância do elo-mais-fraco até a ponta da trinca,  $r_{wl}$ , pode ser associada a uma propriedade do material e permite, desta forma, associá-la com o espalhamento natural dos valores de tenacidade à fratura medidos na transição.

Na teoria dos dois parâmetros J-Q, desenvolvida por O'Dowd e Shih [1], a integral J está associada ao carregamento aplicado e o parâmetro Q está associado ao nível de restrição à plasticidade que se tem na ponta da trinca e que, para cada material, irá depender da geometria trincada, do tamanho e do carregamento aplicado.

Utilizando a teoria J-Q e o princípio do elo-mais-fraco, Landes [2] sugeriu um procedimento para determinar a distância  $r_{wl}$  teórica em um corpo

fraturado, ensaiado a uma certa temperatura, e utilizá-la na previsão da tenacidade à clivagem para outra geometria e/ou temperatura. Este é um procedimento iterativo e é apresentado em detalhes em Miranda e Landes [3].

Valores de tenacidade à clivagem ( $J_c$ ), na região de transição dúctil-frágil de um aço nuclear A508 classe 3, de fabricação nacional, foram medidos no âmbito de um programa experimental onde foram utilizados corpos-de-prova usinados em 3 geometrias (uma só orientação) e ensaiados em 4 temperaturas:  $-75\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-90\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $-100\text{ }^\circ\text{C}$  e  $-106\text{ }^\circ\text{C}$ .

As superfícies de fratura dos corpos-de-prova ensaiados foram observadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) quando se procurou identificar o ponto de disparo da clivagem (elo-mais-fraco) e as respectivas distâncias  $r_{wl}$  foram medidas.

Os valores  $J_c$  experimentais obtidos foram utilizados na determinação das distâncias  $r_{wl}$  teóricas que são comparadas com os valores  $r_{wl}$  medidos e no cálculo da Temperatura de Referência ( $T_0$ ) do material.

## II. VALORES $r_{wl}$ MEDIDOS E VALORES TEÓRICOS

Para a identificação das posições dos elos-mais-fracos e as respectivas medidas  $r_{wl}$  de cada corpo-de-prova, pelo menos uma das superfícies de fratura foi observada (fractografia). No intuito de controlar o processo de observação, identificação do elo-mais-fraco e medição da distância  $r_{wl}$ , algumas medidas foram refeitas, para algumas das superfícies de fratura já observadas e outras medidas foram

realizadas na segunda superfície de fratura de alguns dos corpos-de-prova.

Os valores  $r_{wl}$  encontrados são apresentados nas tabelas 1 a 3 juntamente com os valores  $r_{wl}$  teóricos que foram calculados a partir da aplicação da 1ª parte da metodologia de previsão de tenacidade à clivagem na transição Landes [2], descrita em detalhes em Miranda [4].

Foram utilizadas as curvas do fator Q associadas com a geometria SENB com  $a/W=0.5$  (O'Dowd & Shih, [1]), considerando aproximadamente  $n = 8$  (expoente do ajuste de Ramberg-Osgood para a curva tensão  $\times$  deformação real do aço ensaiado).

A coluna "código" das tabelas indica o grau de dificuldade na realização desta identificação, conforme detalhado abaixo:

certeza ("c") – a identificação clara e imediata do ponto ou região onde o processo de clivagem se iniciara; provável ("p") – identificação do elo-mais-fraco não tão clara mas ainda possível com alguma dificuldade ou quando havia duas posições prováveis; incerta ("i") – quando a identificação da região do elo-mais-fraco que não se enquadrava nas duas situações anteriores.

Nas fig. 1 a 3 tem-se a comparação gráfica entre os valores  $r_{wl}$  teóricos (triângulos), com as respectivos valores medidos (marcados com "+", "o" e "\*"). As barras horizontais delimitadas por "++", "oo" e "\*" representam as múltiplas medidas efetuadas em uma dada superfície.

Em algumas situações, foi identificada a região mas não o ponto de disparo do processo de clivagem (o elo-mais-fraco), dentro desta região.

TABELA 1. Medidas dos Elos-mais-Fracos –  $\frac{1}{2}T$  CT

T = -75 °C				
$J_c$ kJ/m <sup>2</sup>	$K_{Jc}$ MPa√m	$r_{wl}$ medido μm	código	$r_{wl}$ teórico μm
125,5	161,0	525/542	i	626
120,0	157,2	122/540	c	609
62,0	113,2	689	p	375
203,9	205,4	706	p	803
95,9	140,8	314/570	c	524
43,9	95,2	241/432	p	280
106,5	148,4	286	p	562
52,2	103,9	248/485	c	324
83,9	131,8	720	i	476
120,4	157,8	738	p	610
121,1	158,3	295/311	c	613
131,2	164,7	146/242	c	643

T = -100 °C				
$J_c$ kJ/m <sup>2</sup>	$K_{Jc}$ MPa√m	$r_{wl}$ medido μm	código	$r_{wl}$ teórico μm
38,1	88,8	178/480	i	302
31,8	81,2	307/356	i	252
42,5	93,7	339	p	332
108,3	149,7	397	p	697
101,6	144,9	200/854	i	665
46,7	98,3	72/222	c	361
47,2	98,8	375/900	i	364
53,5	105,2	172/710	p	404
30,6	79,6	317	c	242
27,5	75,4	302/604	p	216
35,6	85,8	135/157	p	283
100,1	143,9	510	i	659

TABELA 2. Medidas dos Elos-mais-Fracos – Charpy

T °C	J <sub>c</sub> kJ/m <sup>2</sup>	K <sub>Jc</sub> MPa√m	r <sub>wl</sub> medido		r <sub>wl</sub> teórico μm
			μm	código	
-106	66,6	117,3	361/571	i	437
	61,6	112,4	358	i	417
	92,4	138,2	226/260	p	503
	66,9	117,7	147	c	438
	67,0	117,7	222/90	c/c	438
	32,6	82,1	90/181	p	275
-90	51,6	103,3	266/223	p/i	288
	73,9	123,6	122/300	c/p	349
	45,8	97,4	307/492	p/p	266
	111,8	152,0	278/558	i/i	421
	17,2	59,7	263/300	p/p	126
	81,7	130,0	247	p	364
	58,1	109,6	351	i	310
	90,1	136,5	396/669	i/i	381
-75	95,5	140,5	273/398	p/p	392
	141,4	171,0	206/239	c/c	461
	161,2	182,6	271	p	392
	190,3	198,4	439/649	c	416
	78,6	127,5	213/354	p	274
	236,7	221,2	329	p	439
	203,4	205,1	311	i	424
	202,8	204,8	377	p	423

Nestas situações, procurou-se fazer duas medidas que fornecem a faixa de largura desta região, na qual se supõe que o elo-mais-fraco esteja.

As medidas repetidas na mesma superfície de fratura ou na segunda superfície de fratura de um mesmo corpo-de-prova apresentaram o mesmo grau de dificuldade e de dispersão observados nas primeiras medidas. Por este motivo estas medidas repetidas foram condensadas pelos valores mínimo e máximo encontrados.

### III. FRACTOGRAFIAS

Algumas fractografias típicas, realizadas nas superfícies de fratura de alguns dos corpos-de-prova ensaiados, são apresentadas nas fig. 4 a 11. Outras fractografias são apresentadas em Miranda [5].

No título de cada figura está identificado o código (i), (c) e (p) associado com a identificação do elo-mais-fraco.

Crescimento de trinca. Foi encontrado menos de 0,1 mm de crescimento de trinca antes da clivagem, em alguns corpos-de-prova Charpy e SENB testados a -75 °C.

TABELA 3. Medidas dos Elos-mais-Fracos – 0.354T SENB

T °C	J <sub>c</sub> kJ/m <sup>2</sup>	K <sub>Jc</sub> MPa√m	r <sub>wl</sub> medido		r <sub>wl</sub> teórico μm
			μm	código	
-75	236,7	221,3	444/832	p	654
	183,6	194,9	371	i	571
	231,7	218,9	400/447	i	648
	196,0	201,4	384	c	595
	105,0	147,4	161/237	p	418
	77,6	126,7	236/316	p	346
	188,6	197,5	270/594	p	581
	406,5	290,0	527	c	744
	141,2	170,9	167/643	p	493
-106	36,7	87,1	135/595	i	344
	26,3	73,7	164	p	254
	43,8	95,1	240	i	395
	45,4	96,9	238/714	p	407
	42,1	93,4	133/400	p	384
	99,0	143,1	128/714	i	705
	69,0	119,5	133/333	i	562
	33,0	82,6	167	i	313

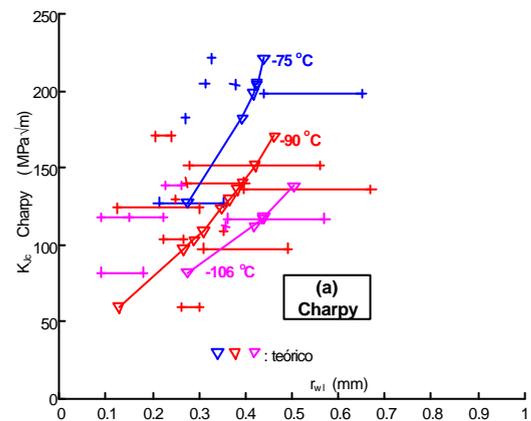


Figura 1. Valores r<sub>wl</sub> Teóricos x Experimentais (Charpy)

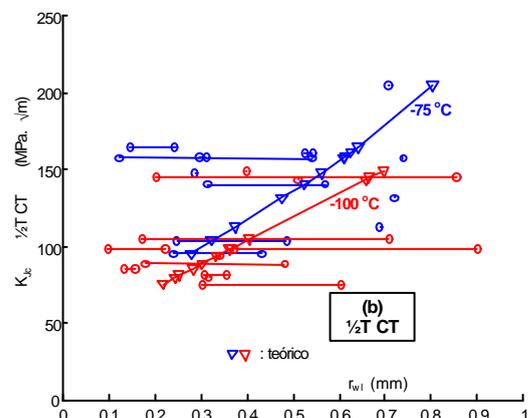


Figura 2. Valores r<sub>wl</sub> Teóricos x Experimentais (1/2T CT)

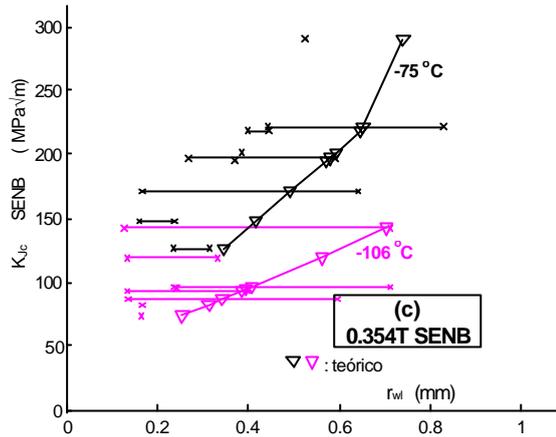


Figura 3. Valores  $r_{wl}$  Teóricos x Experimentais (0.354T SENB)

Este crescimento de trinca é muito pequeno e inferior ao limite de crescimento dúctil de trinca ( $<0,05b_0$ , sendo  $b_0$  o ligamento remanescente) para definir a validade de um resultado experimental a ser utilizado na determinação da temperatura de referência de um aço ferrítico,  $T_0$ , que posiciona a Curva Mestra.

Temperatura de referência,  $T_0$ . A partir dos valores  $J_c$  oriundos dos ensaios, foram obtidos os valores  $K_{Jc}$  equivalentes com os quais foi determinada a temperatura de referência ( $T_0$ ) do aço ensaiado (ASTM 1921-97, [6]).

Este valor ( $T_0$ ) posiciona a chamada Curva Mestra, eq. (1), que define, por sua vez, o comportamento dos valores medianos de tenacidade à clivagem ( $K_{Jc,med}$ ) com a temperatura ( $T$ ) para os aços ferríticos na transição.

$$K_{Jc,med} = 30 + 70e^{0.019(T-T_0)} \quad (1)$$

O procedimento para obter  $T_0$  está normalizado na ASTM 1921-97 [6] e é discutido em detalhes em outro trabalho [4] juntamente com os valores de  $T_0$  encontrados utilizando os valores  $K_{Jc}$  associados com as geometrias e temperaturas de ensaio. Tais valores de  $T_0$  estão muito próximos, em uma faixa de  $\pm 10$  °C em torno do valor médio encontrado:  $-93$  °C.

#### IV. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho pode ser constatada a afirmação

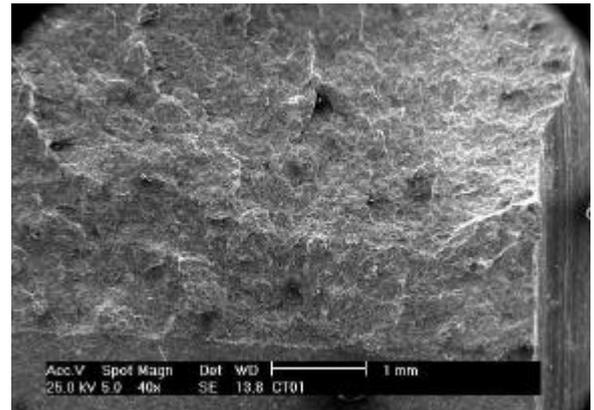


Figura 4. CT,  $J_c=38,1$  kJ/m<sup>2</sup>,  $T=-100$  °C (i)

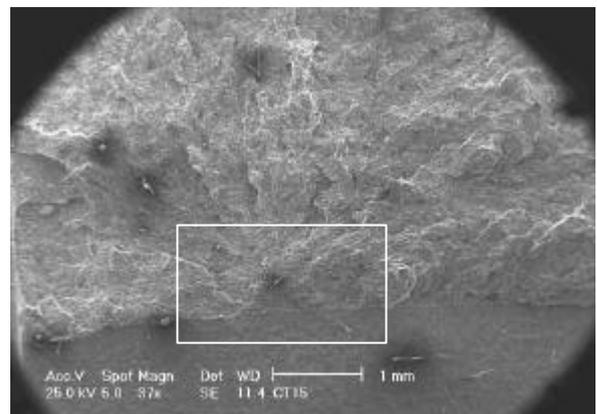


Figura 5. CT,  $J_c=30,6$  kJ/m<sup>2</sup>,  $T=-100$  °C (c)

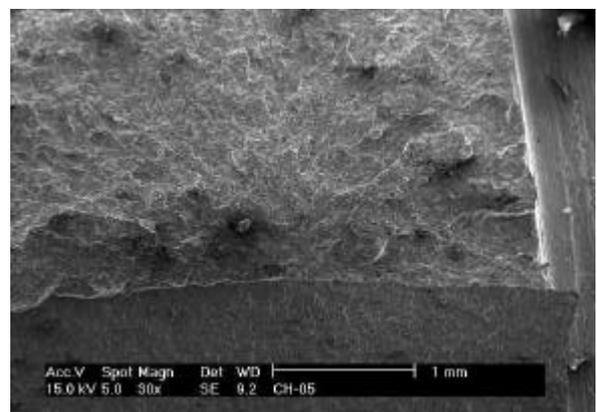


Figura 6. Charpy,  $J_c=45,8$  kJ/m<sup>2</sup>,  $T=-90$  °C (p)

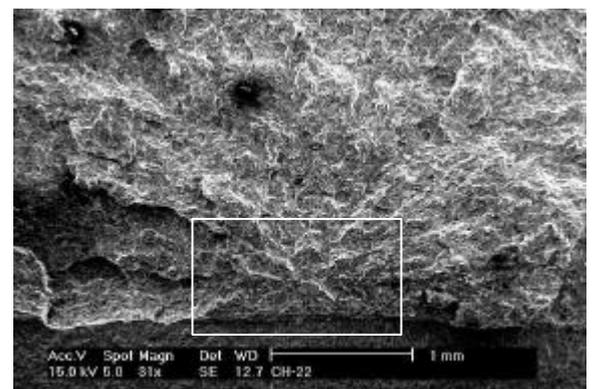


Figura 7. Charpy,  $J_c=141,4$  kJ/m<sup>2</sup>,  $T=-90$  °C (c)

de Mäntylä et al. [7] de que a identificação precisa da posição do elo-mais-fraco é difícil, e subjetiva em muitos casos. Mesmo quando a região de início da clivagem era identificada com razoável grau de certeza, e diferentemente do que afirmado por Bicego e Rinaldi [8], nem sempre foi possível identificar a micro-região ou partícula (elo-mais-fraco) que disparou a clivagem, daí resultando as incertezas apresentadas.

As fractografias apresentadas, fig. 4 a 11, são típicas. Em algumas é possível identificar a região de disparo da clivagem (fig. 5 e 7) e em outras esta identificação é bastante difícil (fig. 4). Observou-se, entretanto, que o grau de dispersão das medidas foi o mesmo tanto para as medidas “incertas” quanto para as medidas múltiplas, realizadas em uma mesma superfície de fratura ou realizadas nas duas superfícies de fratura. Por este motivo os resultados de todas as medidas, associadas a uma dada geometria, foram apresentados juntos (fig. 1 a 3).

A maior dificuldade na identificação do elo-mais-fraco deve ser atribuída ao fato dos ensaios terem sido realizados na região inferior da transição, onde o disparo da clivagem está associado a uma combinação de mecanismos sem predominância do elo-mais-fraco. Isto ocorreu para permitir obter valores  $K_{Ic}$  válidos para determinar a temperatura de referência ( $T_0$ ) do material ensaiado.

Sokolov et al. [9] mencionam que outros mecanismos de disparo da clivagem competem e predominam sobre os elos-mais-fracos quando os ensaios são realizados na parte inferior da região de transição, perdendo totalmente o significado no patamar inferior. Como nos CPs ensaiados praticamente não foi observada a presença de crescimento dúctil significativo da trinca antes da clivagem ocorrer, é possível que em temperaturas mais elevadas este mecanismo de disparo da clivagem (elo-mais-fraco) prevaleça sobre os demais.

Entretanto realizar os ensaios com estes CPs com  $B < 1T$  em temperaturas mais elevadas do que as aqui adotadas implica correr o risco de que os valores  $K_{Ic}$  obtidos dos ensaios não sejam válidos para a determinação de  $T_0$  e, assim, caracterizar a região de transição do material.

Nas fig. 1 a 3 se observa uma fraca correlação entre as distâncias medidas e os valores teóricos obtidos. Este fato confirma que na faixa de temperaturas em que os ensaios foram realizados, região inferior da transição, não há um predomínio claro do mecanismo dos elos-mais-fracos sobre outros mecanismos, no disparo da clivagem.

Embora um número razoável de CPs tenha sido ensaiado para este trabalho de pesquisa, seriam necessários mais ensaios, em temperaturas mais elevadas

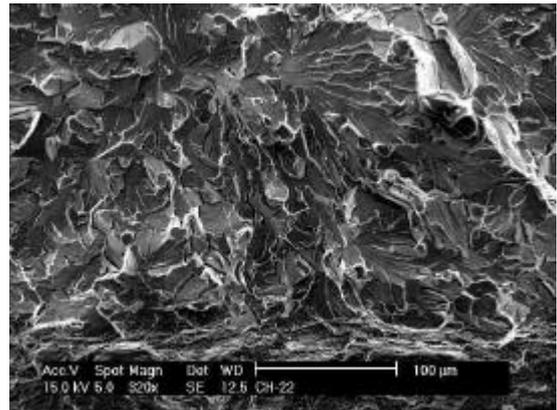


Figura 8. Charpy,  $J_c=141.4 \text{ kJ/m}^2$  (Detalhe)

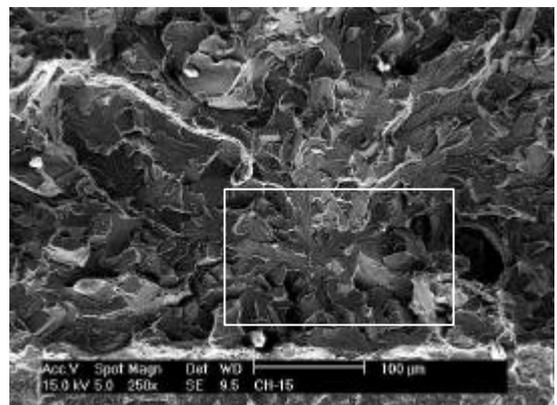


Figura 9. Charpy,  $J_c=67.0 \text{ kJ/m}^2$ ,  $T = -106 \text{ °C}$  (c)

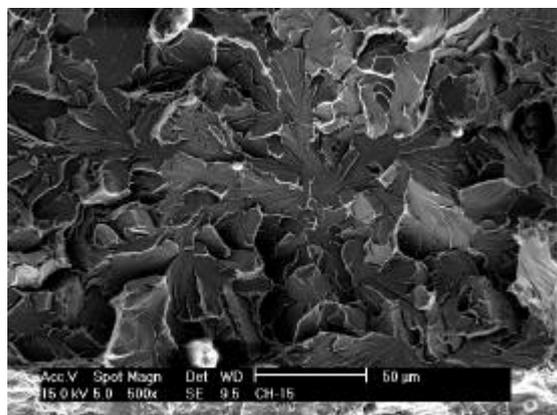


Figura 10. Charpy,  $J_c=67.0 \text{ kJ/m}^2$  (Detalhe)

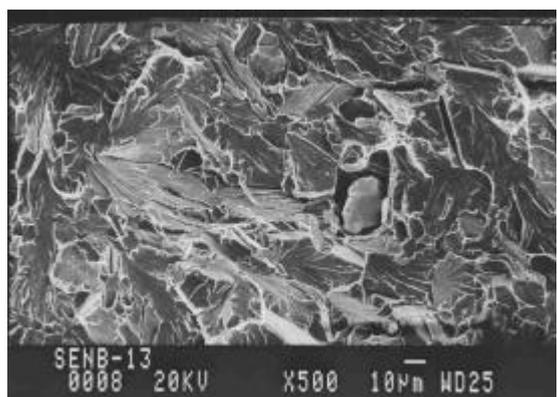


Figura 11. SENB 13,  $J_c=45.4 \text{ kJ/m}^2$ ,  $T=-106 \text{ °C}$  (p)

das para confirmar a correlação entre as distâncias  $r_{wl}$  teóricas e as medidas experimentais, prevista na metodologia de Landes [2] baseada na teoria de dois parâmetros (J-Q) de O'Dowd e Shih [1].

Dentro das limitações de validade da metodologia de previsão de tenacidade à clivagem na transição, mencionada anteriormente, as aplicações desta referida metodologia mostraram bons resultados confirmando indiretamente a validade da hipótese do elo-mais-fraco.

Como continuação deste trabalho, sugere-se um estudo comparativo das duas abordagens, Curva Mestra [6] e metodologia de Landes [2], para verificar o quanto as mesmas concordam, aplicando-as a geometrias simples, cujo fator Q seja conhecido, e para as quais haja valores de tenacidade à clivagem ( $J_c$ ) medidos em, pelo menos, duas temperaturas.

## NOTA e AGRADECIMENTOS

Este trabalho é uma versão reduzida de outro trabalho já publicado [5], com enfoque diferente. O autor agradece ao IPEN e ao CNPq pelo apoio e suporte para a realização da pesquisa, ao Prof. Dr. John D. Landes, da University of Tennessee, TN, USA, e ao Prof. Dr. Arnaldo H. P. de Andrade, IPEN/USP, pela supervisão e orientação, ao Oak Ridge National Laboratory (ORNL), TN, e ao Dr. D. McCabe, do ORNL, pela realização dos ensaios e de discussões dos resultados obtidos.

## V. REFERÊNCIAS

- [1] O'Dowd, N. P.; Shih, C. F., 1993. *Two-Parameter Fracture Mechanics: Theory and Applications*. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC. (Report NUREG/CR-5958).
- [2] Landes, J. D., 1993. *A Two-Criteria Statistical Model for Transition Fracture Toughness*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, v. 16, n. 11, p. 1161-1174.
- [3] Miranda, C. A. J.; Landes, J. D., 1997. *Behavior Prediction in the Ductile-to-Brittle Transition, Part I: An Overview*. Brazilian Symposium on Reactor Physics and Thermal Hydraulics - XI ENFIR, 18 a 22/Agosto, Poços de Caldas, MG, p. 775-780.
- [4] Miranda, C. A. J., 1999. *Obtenção da Tensão de Clivagem e Nível de Confiabilidade na Determinação da Temperatura de Referência de*

*Aços Ferríticos na Transição: Abordagem Numérica e Experimental*. Tese de doutorado, Set/1999, IPEN/USP, São Paulo, SP.

[5] Miranda, C. A. J., 2000. *Distâncias  $r_{wl}$  dos Elos-mais-Fracos Até a Ponta da Trinca por Observação Fractográfica: Comparação com Valores Teóricos*. 55º Congresso da Associação Brasileira de Metais, 24 – 28/Julho/2000, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

[6] ASTM E1921-97, 1997. *Test Method for Determination of the Reference Temperature,  $T_o$ , for Ferritic Steels in the Transition Range*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

[7] Mäntylä, M.; Rossol, A.; Nedbal, I.; Prioul, C.; Marini, B., 1999. *Fractographic Observations of Cleavage Fracture Initiation in a Bainitic A508 Steel*. Journal of Nuclear Materials, v. 264, p. 257-262.

[8] Bicego, V.; Rinaldi, C., 1991. *Fractographic Study of Toughness Variability in the Transition Region*. Defect Assessment in Components – Fundamentals and Applications. ESIS/EGF9, p. 459-475.

[9] Sokolov, M. A.; Wallin, K.; McCabe, D. E., 1997. *Application of Small Specimens to Fracture Mechanics Characterization of Irradiated Pressure Vessels Steels*. Fatigue and Fracture Mechanics: 28<sup>th</sup> Volume. ASTM STP 1321, p. 263-279.

## ABSTRACT

Among the existing approaches to predict  $J_c$ , in the transition region of the ferritic steels, there are statistical and deterministic methods. Among the formers we have the methodology based on the two-parameter J-Q theory and the weakest-link concept with its characteristic distance,  $r_{wl}$ . For this work, an experimental program was developed using 65 fracture mechanics specimens made from an A508 steel, in three geometries with thickness  $B < 1T = 25.4$  mm, and tested at four transition temperatures. After the tests to measure  $J_c$ , all specimen fracture surfaces were observed by scanning electron microscopy to identify the cleavage trigger points (weak-links) and to measure their characteristic distances  $r_{wl}$  to the crack tip. The  $J_c$  and  $r_{wl}$  values were presented and compared with the theoretical ones.