

# MEDIDAS EXPERIMENTAIS DE TENACIDADE À CLIVAGEM COM CORPOS DE PROVA PEQUENOS NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO E OBTENÇÃO DA CURVA MESTRA

**Carlos Alexandre de J. Miranda**

IPEN-CNEN/SP, Travessa R, 400.

05508-900, S. Paulo, SP, Brasil. E-mail: cmiranda@net.ipen.br

## Resumo

Neste trabalho são apresentados os resultados de um programa experimental envolvendo ensaios de 65 corpos de prova de mecânica da fratura com espessura  $B < 1T = 25.4$  mm, confeccionados com aço A508 classe 3 nacional, em três geometrias:  $\frac{1}{2}T$  CT (corpo de prova compacto), Charpy e SENB (seção transversal de 9mm x 18mm). Os ensaios foram realizados em quatro temperaturas na região de *transição* dúctil-frágil deste material:  $-106$  °C,  $-100$  °C,  $-90$  °C e  $-75$  °C. Foram medidos os valores de tenacidade à clivagem, expressos em termos da Integral J no momento da clivagem ( $J_c$ ), posteriormente transformados em valores equivalentes do fator intensidade de tensão ( $K_{Jc}$ ). Todos os corpos de prova tiveram as suas dimensões e tamanhos de trinca inicial e final controladas e comparadas com os valores nominais. A partir dos resultados obtidos calcula-se a temperatura de referência ( $T_0$ ) do material, a qual permite posicionar a chamada curva mestra que fornece a variação dos valores  $K_{Jc}$  (medianos associados a espessura unitária) com a temperatura, na transição.

**Palavras-chave:** Mecânica da Fratura, Aços Ferríticos, Resultados Experimentais, Transição, Temperatura de Referência.

## 1. INTRODUÇÃO

A mecânica da fratura procura caracterizar o comportamento dos materiais e estruturas que apresentam um defeito ou trinca. Isto é realizado através de um tratamento quantitativo a partir do relacionamento da resistência à fratura do material do corpo trincado com a sua geometria e carregamento aplicado. A resistência à fratura ou resistência à propagação da trinca é chamada tenacidade do material. A força motriz da trinca (FMT), associada ao carregamento aplicado, é usualmente medida pelos parâmetros Fator Intensidade de Tensão (K) ou Integral J (J). O primeiro se aplica no caso da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) quando a plasticidade na ponta da trinca é inexistente ou muito reduzida. Neste caso quando a FMT (K) iguala um valor crítico ( $K_c$ ) a fratura ocorre de forma brusca por clivagem: um súbito e instável crescimento da trinca.

Quando a plasticidade ocorre de forma que o Fator Intensidade de Tensão perde a sua validade se passa para o âmbito da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) onde se utiliza a Integral J ( ou o seu equivalente: CTOD, o deslocamento de abertura da ponta da trinca) como parâmetro para caracterizar o estado de tensões na ponta da trinca. Na MFEP, quando a FMT (J) iguala o valor crítico do material a trinca cresce de forma estável (dúctil)

até que ocorra a instabilidade e a conseqüente ruptura.

Os aços ferríticos apresentam uma típica curva de variação da tenacidade com a temperatura que, em baixas temperaturas apresenta um patamar bem definido onde a tenacidade varia muito pouco e a ruptura de um corpo trincado se dá por clivagem. Em altas temperaturas a curva pode ser vista como tendo um outro patamar onde a ruptura pode ocorrer pelo chamado rasgamento dúctil, ou por colapso plástico (quando, então, a estrutura deixa de ser capaz de desenvolver tensões que equilibrem as cargas externas). Entre estes dois patamares há uma região de *transição*, onde é usual se trabalhar com os dados de tenacidade à fratura, basicamente a Integral J no momento da clivagem,  $J_c$ , e é caracterizada por: (1) variabilidade do valor mediano de  $J_c$  com a temperatura; (2) possível presença simultânea dos dois mecanismos de ruptura: crescimento dúctil seguido de clivagem; (3) grande espalhamento dos resultados mesmo quando obtidos para uma só geometria, tamanho e temperatura e; (4) corpos de prova (CPs) menores apresentarem um maior espalhamento e valores medianos de  $J_c$  maiores do que os valores obtidos com CPs maiores.

O grande espalhamento dos valores medidos na transição impede a obtenção de um valor característico, i. e: um valor único de tenacidade que caracterize o estado de tensões na ponta da trinca. As características da transição tornam necessário o tratamento estatístico dos valores experimentais e tornam difícil a previsão do comportamento à fratura do material na *transição* e, principalmente, a transferência de resultados obtidos com ensaios de CPs padronizados, para as estruturas reais que estejam operando ou venham a operar na *transição*.

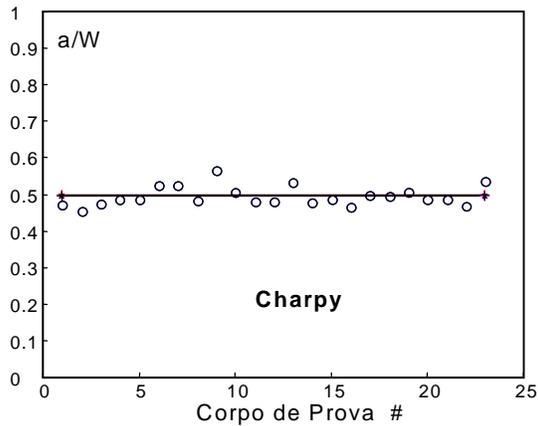
Wallin [1991] propôs uma expressão, para caracterizar o comportamento dos valores de tenacidade à clivagem medianos, expressos em termos do fator intensidade de tensões equivalentes ( $K_{Jc}$ ), associados com CPs de espessura “unitária” ( $B=1T$ ) - a chamada Curva Mestre, cuja forma é fixa e independente do material. Esta expressão é indexada pela chamada temperatura de referência,  $T_o$ , que posiciona a curva no eixo das temperaturas. A norma E1921 [ASTM 1997] apresenta um método para determinar  $T_o$  a partir de um conjunto com, no mínimo, 6 valores  $K_{Jc}$  “válidos” obtidos em uma única temperatura.

Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados de um programa experimental [Miranda, 1999] envolvendo ensaios de 65 corpos de prova de mecânica da fratura com espessura  $B<1T$ , na *transição*. Os corpos de prova foram confeccionados com aço nuclear A508 classe 3 sendo todos usinados em uma mesma orientação. Dois conjuntos de 12 corpos de prova  $\frac{1}{2}T$  CT foram ensaiados a  $-100$  °C e a  $-75$  °C. Dois conjuntos de 9 e 8 corpos de prova SENB, com seção de 9 mm x 18 mm, foram ensaiados respectivamente a  $-106$  °C e a  $-75$  °C. Três conjuntos de 6, 10 e 6 corpos de prova Charpy (seção 10 mm x 10 mm) pré-trincados foram ensaiados respectivamente a  $-106$  °C,  $-90$  °C e  $-75$  °C. Em todos os corpos de prova foi realizado um entalhe lateral (“*side grooving*”) correspondente a 20% da espessura nominal. Estes ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E1921-97 que também foi utilizada na análise dos mesmos. Os valores  $J_c$  e  $K_{Jc}$  são apresentados e, em particular, é discutida a validade do valor  $T_o$  determinado a partir dos valores  $K_{Jc}$  obtidos com corpos de prova pequenos e é estimada a temperatura máxima de ensaio destas geometrias.

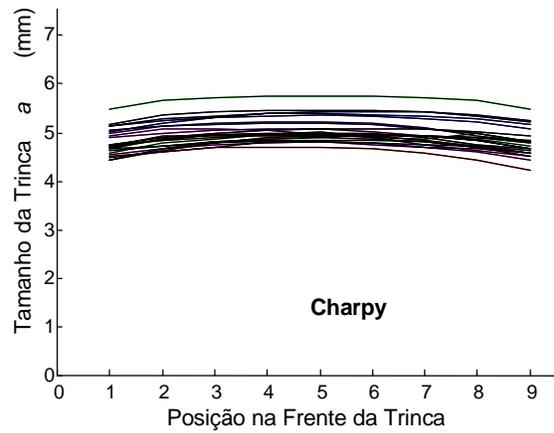
## 2. CONTROLES DIMENSIONAIS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS

Nas figuras 1 a 6 são apresentadas as principais dimensões dos corpos de prova ensaiados e confrontadas com os seus valores nominais. Antes dos ensaios os corpos de prova foram pré-trincados para se atingir o valor desejado para a relação  $a/W$ . Após os ensaios, para cada corpo de prova, o tamanho da trinca foi medido em 9 posições cujo valor médio é o valor  $a$  (tamanho da trinca) a ser considerado para o corpo de prova. Para os corpos de prova Charpy e SENB, com um valor nominal  $a/W=0.5$ , se obteve, no conjunto, um valor médio  $a/W=0.495$  e  $a/W=0.527$  respectivamente ( $W$  é a largura do corpo de prova). Para os corpos de prova CT

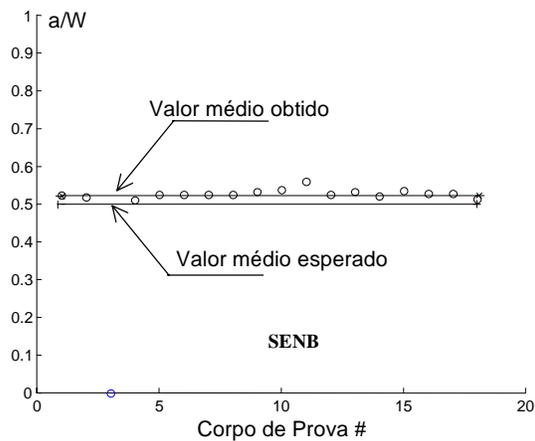
ensaiados, para  $a/W=0.60$ , nominal, obteve-se um valor médio  $a/W=0.63$ . Estes valores médios de  $a/W$  mostram um bom controle do processo de pré-trincagem dos corpos de prova.



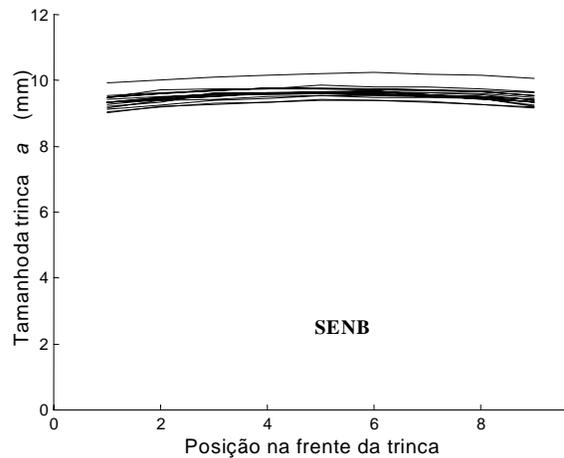
**Figura 1.** Relação  $a/W$  - Charpy



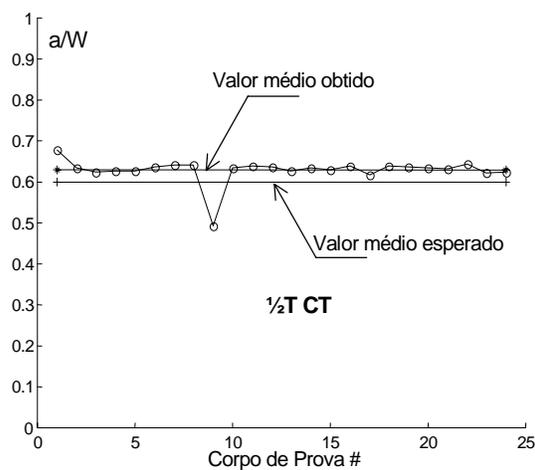
**Figura 2.** Perfil da frente da trinca - Charpy



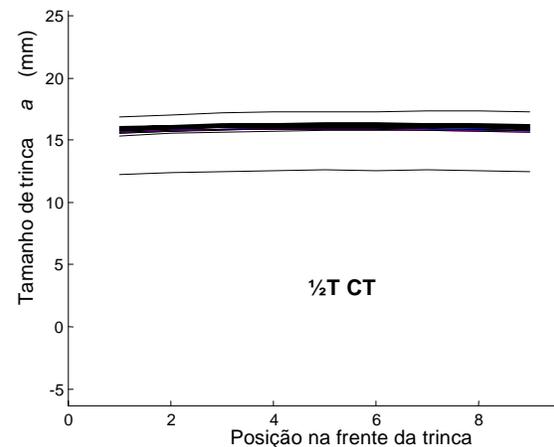
**Figura 3.** Relação  $a/W$  – SENB



**Figura 4.** Perfil da frente da trinca – SENB



**Figura 5.** Relação  $a/W$ -  $1/2T$  CT



**Figura 6.** Perfil da frente da trinca –  $1/2T$  CT

### 3. VALORES DE TENACIDADE À CLIVAGEM MEDIDOS

Os registros dos ensaios são do tipo apresentado na figura 7, a partir dos quais é possível calcular o valor da Integral J no momento da clivagem ( $J_c$ ) que são transformados em valores

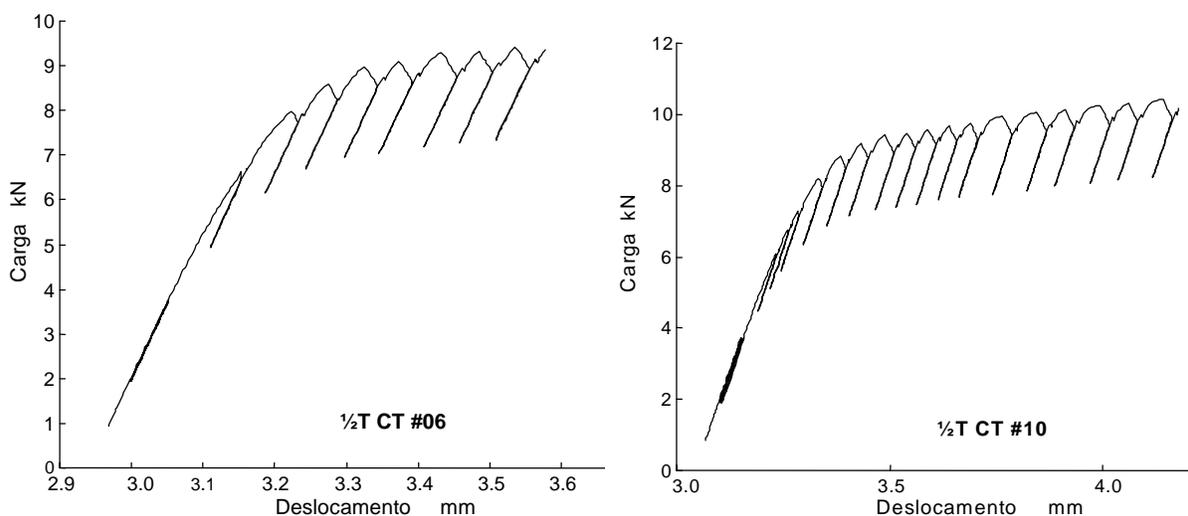
$K_{Jc}$  através da eq. (1) sendo  $E$  e  $\nu$ , respectivamente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material. A norma ASTM E1921 [1997] adota o estado plano de tensões.

Os valores de tenacidade à clivagem medidos nas diversas temperaturas dos ensaios são apresentados nas tabelas 1 a 3, respectivamente para as geometrias SENB, Charpy e CT, e na figura 8. Para cada corpo de prova são indicados os valores  $a/W$  medidos após os ensaios, o número de identificação gravado no corpo de prova, os valores  $J_c$  medidos, em  $\text{kJ/m}^2$ , e os respectivos valores  $K_{Jc}$  equivalentes, em  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Os resultados da análise realizada nas superfícies de fratura, destes corpos de prova, através de microscópio eletrônico de varredura, quando se procurou identificar os pontos, chamados elos-mais-fraco, onde se iniciou a clivagem, são apresentados em outro trabalho Miranda [2000a].

O corpo de prova SENB de número 3 teve o ensaio interrompido no início por problemas de fixação do “clip gage” e o respectivo resultado, por esta razão, não é indicado. No caso do corpo de prova Charpy número 23, também houve problemas durante o ensaio, praticamente no final do mesmo. O resultado obtido é indicado mas foi descartado das análises.

$$K = \sqrt{J E'} ; \quad E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad \text{para estado plano de tensões}$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad \text{para estado plano de deformações} \quad (1)$$



**Figura 7.** Curvas Carga x Deslocamento dos ensaios de  $J_c$

**Tabela 1.** Tenacidade à clivagem - Geometria SENB (9mm x 18mm)

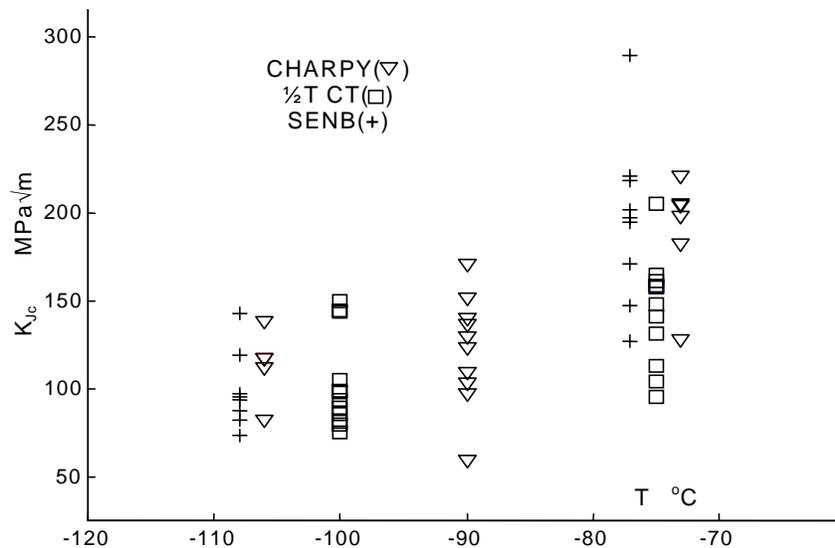
T	CP #	a/W	$J_c$ $\text{kJ/m}^2$	$K_{Jc}$ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	T	CP #	a/W	$J_c$ $\text{kJ/m}^2$	$K_{Jc}$ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
-106 °C	1	0.53	36.7	87.1	-75 °C	2	0.54	236.7	221.3
	6	0.52	26.3	73.7		4	0.56	183.6	194.9
	12	0.52	43.8	95.1		5	0.53	231.7	218.9
	13	0.53	45.4	96.9		7	0.54	196.0	201.4
	14	0.53	42.1	93.4		8	0.52	105.0	147.4
	15	0.53	99.0	143.1		9	0.54	77.6	126.7
	16	0.53	69.0	119.5		10	0.53	188.6	197.5
	18	0.54	33.0	82.6		11	0.53	406.5	290.0
				17		0.52	141.2	170.9	

**Tabela 2.** Tenacidade à clivagem - Geometria Charpy

T	CP #	a/W	J <sub>c</sub> kJ/m <sup>2</sup>	K <sub>Jc</sub> MPa√m	T	CP #	a/W	J <sub>c</sub> kJ/m <sup>2</sup>	K <sub>Jc</sub> MPa√m
-75 °C	2	0.45	161.2	182.6	-90 °C	1	0.47	51.6	103.3
	3	0.47	190.3	198.4		5	0.48	45.8	97.4
	6	0.52	78.6	127.5		17	0.49	17.2	59.7
	7	0.52	236.7	221.2		18	0.49	81.7	130.0
	8	0.48	203.4	205.1		19	0.50	58.1	109.6
	9	0.56	202.8	204.8		20	0.48	90.1	136.5
-106 °C	11	0.48	66.6	117.3		4	0.48	73.9	123.6
	12	0.48	61.1	112.4		10	0.50	111.8	152.0
	13	0.53	92.4	138.2		21	0.48	95.5	140.5
	14	0.48	66.9	117.7		22	0.47	141.4	171.0
	15	0.48	67.0	117.7		23	(1)	> 56.4	> 108.0
	16	0.46	32.6	82.1		(1) – Ensaio com problemas (descartado)			

**Tabela 3.** Tenacidade à clivagem - Geometria ½T CT

T	CP #	a/W	J <sub>c</sub> kJ/m <sup>2</sup>	K <sub>Jc</sub> MPa√m	T	CP #	a/W	J <sub>c</sub> kJ/m <sup>2</sup>	K <sub>Jc</sub> MPa√m
-100 °C	01	0.64	38.1	88.8	-75 °C	07	0.68	125.5	161.1
	02	0.63	31.8	81.2		08	0.63	120.0	157.5
	03	0.63	42.5	93.7		09	0.63	62.0	113.2
	04	0.64	108.3	149.7		10	0.63	203.9	205.4
	05	0.62	101.6	144.9		11	0.63	95.9	140.8
	06	0.62	46.7	98.3		12	0.64	43.9	95.2
	13	0.63	47.2	98.8		19	0.64	106.5	148.4
	14	0.63	53.5	105.2		20	0.64	52.2	103.9
	15	0.63	30.6	79.6		21	0.49	83.9	131.8
	16	0.64	27.5	75.4		22	0.63	120.4	157.8
	17	0.62	35.6	85.8		23	0.64	121.1	158.3
	18	0.64	100.1	143.9		24	0.64	131.2	164.7



**Figura 8.** Resultados (valores K<sub>Jc</sub>) obtidos dos ensaios

### 3.1 Crescimento de trinca

Não foi observado nenhum crescimento estável de trinca ( $\Delta a$ ) nos CPs Charpy ensaiados a  $-106\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e  $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . E menos de  $0.1\text{ mm}$  ( $<0.05b_o$ ) de crescimento estável de trinca foi observado em alguns CPs ensaiados a  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nos CPs SENB ensaiados a  $-106\text{ }^{\circ}\text{C}$  não foi observado crescimento de trinca e foi observado  $\Delta a < 0.1\text{ mm}$  ( $<0.05b_o$ ) em alguns corpos de prova ensaiados a  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Não foi observado crescimento de trinca em nenhum dos CPs  $\frac{1}{2}\text{T CT}$ .

### 4. TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DO MATERIAL ENSAIADO

Através da eq. (1) os valores  $J_c$ , obtidos dos ensaios, são transformados em valores  $K_{Jc}$  equivalentes que são utilizados na determinação da temperatura de referência ( $T_o$ ) do material após serem normalizados para uma espessura unitária ( $B_{1T}$ ) pela eq. (2). Nesta eq.,  $B_{xT}$  é a espessura dos corpos de prova ensaiados,  $K_{B1T}$  é o valor normalizado para  $1T$ ,  $K_{Bx}$  é o valor obtido nos ensaios e  $K_{\min}$  é um valor limiar do fator intensidade de tensões abaixo do qual a probabilidade de ocorrer fratura por clivagem é nula. A norma ASTM E1921 [1997] adota  $K_{\min} = 20\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

$$K_{B1T} = K_{\min} + (K_{Bx} - K_{\min}) \left( \frac{B_{xT}}{B_{1T}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

A chamada Curva Mestra, eq. (3), proposta por Wallin [1991], representa o comportamento dos valores  $K_{Jc}$  medianos,  $K_{Jc,med}$ , (probabilidade acumulada de fratura de 50%), na região de transição, associados a uma espessura unitária. A temperatura de referência  $T_o$  é tal que  $K_{Jc,med} = 100\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  quando  $T=T_o$ , isto é: quando o ensaio é realizado na temperatura de referência  $T = T_o$ .

$$K_{Jc,med} = 30 + 70e^{0.019(T-T_o)} \quad (3)$$

A norma ASTM E1921-97 estabelece o procedimento para calcular  $T_o$  a partir de um conjunto mínimo de seis valores  $K_{Jc}$  “válidos”. No âmbito desta norma são válidos aqueles valores  $K_{Jc}$  que sejam iguais ou inferiores ao valor  $K_{Jc,limite}$  dado pela eq. (4) onde  $b_o$  é o ligamento remanescente ( $=W-a$ ),  $\sigma_{ys}$  é o limite de escoamento do material na temperatura de ensaio. A partir dos trabalhos de Dodds et al. [1995] e Ruggieri et al. [1998] o valor de  $M$  foi estabelecido em  $M = 30$  de tal forma que seja mínima a discrepância entre o valor de  $J$  calculado na ensaio (*far field J*) e o valor teórico existente na ponta da trinca (*near crack tip J*). Esta condição limita severamente a temperatura de ensaio para os corpos de prova pequenos. No âmbito deste trabalho, para obter  $K_{Jc,limite}$  foi considerado um único valor de  $\sigma_{ys} = 570\text{ MPa}$  para as 4 temperaturas dos ensaios e foi adotado  $E = 210\text{ GPa}$ .

$$K_{Jc,limite} = \sqrt{\frac{\sigma_{ys} E b_o}{M}} \quad (4)$$

Uma discussão detalhada do procedimento da norma ASTM E1921-97 para determinar o valor de  $T_o$ , inclusive para as situações em que existem valores  $K_{Jc}$  inválidos, i.e: superiores a  $K_{Jc,limite}$  é apresentada em [Miranda, 2000b]. Na tabela 4 são apresentados os valores da temperatura de referência ( $T_o$ ) do material ensaiado e alguns parâmetros intermediários obtidos no processo de cálculo de  $T_o$ .

**Tabela 4.** Valores de  $T_o$  e parâmetros obtidos

Geometria	T (°C)	# de CPs / resultados válidos	Parâmetros da Curva Mestra			$T_o$ médio (°C)
			$K_{Jc,median}$ <sup>1</sup> MPa√m	$K_o$ <sup>1</sup> MPa√m	$T_o$ (°C)	
<b>CT</b>	-75	12 / 11	143.3	156.6	-90.7	<b>-92.7</b>
	-100	12 / 12	107.7	116.1	-94.8	
<b>Charpy</b>	-75	6 / 1	183.2	220.8	[-109.6] <sup>2</sup>	-----
	-90	10 / 8	123.9	133.9	-92.9	-96.1
	-106	6 / 6	110.7	119.4	-99.4	
<b>SENB</b>	-75	9 / 3	197.5	236.0	[-112.2] <sup>2</sup>	-----
	-106	8 / 8	100.6	108.3	-90.5	-90.5
(Média geral)						-93.1

<sup>1</sup> – antes do ajuste de espessura; [<sup>2</sup>] – não é um valor válido

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dois conjuntos com 12 corpos de prova ½T CT cada um, ensaiados a -100 °C e -75 °C, forneceram praticamente o mesmo valor de  $T_o$  com cerca de +/- 2 °C em relação ao seu valor médio (-92.7 °C).

A partir do conjunto de 8 corpos de prova SENB ensaiados a -106 °C obteve-se  $T_o$  = -90.5 °C. Este valor é muito próximo daquele valor médio obtido com os corpos de prova CT.

O conjunto de CPs Charpy, com 6 resultados, todos válidos, ensaiado a -106 °C forneceu  $T_o$  = -99.4 °C. A temperatura de referência obtida com os corpos de prova Charpy ensaiados a -90 °C é -92.9 °C.

A aceitação destes valores, como preconizado pela norma E1921 [ASTM 1997] implica a aceitação implícita de uma faixa de, pelo menos, +/- 10 °C em torno do valor provável da temperatura de referência (de -99.4 °C a -90.5 °C).

A média geral para a temperatura de referência, considerando os 5 conjuntos com pelo menos 6 valores válidos, é -93.1 °C.

*Análise fractográfica e confiabilidade no valor de  $T_o$ .* A determinação do valor  $T_o$  é um processo estatístico e a quantidade N de resultados  $K_{Jc}$  influi no valor obtido para  $T_o$ . Quanto maior for o valor de N maior será a confiabilidade no valor  $T_o$ . Esta confiabilidade varia, também com a temperatura de ensaio. Dada a natureza da Curva Mestra, as incertezas na determinação de  $T_o$  são maiores na região de baixas temperaturas ( $T < T_o$ ), onde os ensaios com corpos de prova pequenos devem ser realizados – eq. (4). A confiabilidade no valor  $T_o$  em função de N e T é discutida em outro trabalho [Miranda 2000c].

*Máxima temperatura de ensaio.* Para os CPs Charpy tem-se  $K_{Jc,limite} \approx 140$  MPa√m. Enquanto todos os valores  $K_{Jc}$  obtidos a -106 °C são válidos para determinar  $T_o$ , somente 1 valor obtido a -75 °C é válido. No grupo de 10 CPs ensaiados a -90 °C foram obtidos 8

valores válidos. Para os corpos de prova SENB, tem-se  $K_{Jc,limite} \approx 190 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Assim, enquanto que todos os 8 valores  $K_{Jc}$  obtidos a  $-106 \text{ }^\circ\text{C}$  são válidos para determinar  $T_o$ , somente 3 entre os 9 valores obtidos a  $-75 \text{ }^\circ\text{C}$  são válidos e existem, nesta última temperatura, 3 outros valores muito próximos do limite. Corpos de prova  $1/2T \text{ CT}$ ,  $K_{Jc,limite} \approx 200 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ : a  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  todos os 12 valores  $K_{Jc}$  obtidos são válidos e, a  $-75 \text{ }^\circ\text{C}$  existem 11 valores válidos para determinar  $T_o$ , entre os 12 valores obtidos.

## 6. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, a temperatura de referência do material ensaiado é de  $T_o = -93.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Para este material, é possível avaliar a temperatura máxima ( $T_{max}$ ) em que se pode ensaiar os CPs com as geometrias utilizadas e, ainda assim, obter 6 valores válidos para determinar  $T_o$  sem incorrer em um número exagerado de resultados inválidos.

*Geometria  $1/2T \text{ CT}$*  – Devido a natureza exponencial da Curva Mestra,  $T_{max}$  não deve estar muito longe da faixa  $-70 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $-65 \text{ }^\circ\text{C}$ , i. e.:  $(T-T_o)_{max} \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$  sob risco de se ter um grande número de resultados inválidos e, conseqüentemente, necessidade de ensaiar um número ainda maior de corpos de prova.

*Geometria  $(0.4T) \text{ Charpy}$*  – A  $-75 \text{ }^\circ\text{C}$  só houve um resultado válido e a  $-90 \text{ }^\circ\text{C}$  oito são válidos em um grupo de 10 resultados. Isto mostra que para esta geometria  $T_{max}$  está ligeiramente superior mas em torno de  $-90 \text{ }^\circ\text{C}$ , i. e.:  $(T-T_o)_{max} \approx 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Geometria  $0.354T \text{ SENB}$*  – A  $-75 \text{ }^\circ\text{C}$  foram obtidos 3 resultados válidos, isto mostra que é possível obter o número mínimo de resultados válidos exigidos pela norma E1921 [ASTM, 1997], a esta temperatura, pelo aumento, embora não exagerado, do número de CPs ensaiados. Assim esta temperatura parece ser o valor para  $T_{max}$  visando determinar  $T_o$  com esta geometria ( $B = 9 \text{ mm}$ ,  $W = 18 \text{ mm}$ ), i. e.:  $(T-T_o)_{max} \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Considerando a média geral de  $T_o$  ( $-93.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ou o valor médio obtido com os corpos de prova  $1/2T \text{ CT}$  ( $-92.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ), como temperatura de referência para este material ensaiado, os resultados obtidos com o presente estudo mostram que é possível ter um valor confiável de  $T_o$  ensaiando corpos de prova pequenos ( $B < 1T$ :  $1/2T \text{ CT}$ , Charpy e  $0.354T \text{ SENB}$ ).

## 7. REFERÊNCIAS

- ASTM E1921, 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.
- Dodds Jr., R. H., Ruggieri, C., Anderson, T. L., 1995. *Numerical Modeling of Ductile Tearing Effects on Cleavage Fracture Toughness*. In: *Constraint Effects in Fracture. Theory Second Volume*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. ASTM STP 1244, p. 100-133.
- 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.
- Miranda, C. A. J., 2000a. *Distâncias dos Elos-mais-Fracos até a Ponta da Trinca – Análise Fractográfica*. Trabalho submetido para o XII ENFIR – Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica a ser realizado no Rio de Janeiro/RJ, em Outubro/2000.
- Miranda, C. A. J., 2000b. *A Curva Mestra e o Conceito de Temperatura de Referência Para*

- Ajustar os Valores de Tenacidade à Clivagem na Transição de Aços Ferríticos.* Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2000), 07-11/Agosto, Natal, RN.
- Miranda, C. A. J., 2000c. *Curvas de Confiabilidade na Determinação da Temperatura de Referência de Aços Ferríticos na Transição Dúctil-Frágil.* Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2000), 07-11/Agosto, Natal, RN.
- Ruggieri, C., Dodds Jr., R. H., Wallin, K., 1998. *Constraint Effects on Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the transition Region.* Engineering Fracture Mechanics, v. 60, n. 1, p. 19-36.
- Wallin, K., 1991. *Fracture Toughness Transition Curve Shape for Ferritic Structural Steels.* In: JointT FEEG/ICF International Conference on Fracture of Engineering Materials, Singapore, August 6-8, p. 83-88.