

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA (T_0) DE UM AÇO DIN15Mo3 NORMALIZADO E TRATADO TERMICAMENTE, SIMULANDO UMA ZTA.**Emerson Giovani Rabello**

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN / CENM
Rua Prof. Mário Werneck, s/n - Pampulha - Caixa Postal 941 - 30123-970, Belo Horizonte, MG
egr@urano.cdtn.br

Julio Ricardo Barreto Cruz

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN
Rua Prof. Mário Werneck, s/n - Pampulha - Caixa Postal 941 - 30123-970, Belo Horizonte, MG
jrbc@cdtn.br

Leonardo Barbosa Godefroid

Escola de Minas - UFOP
Praça Tiradentes, 20 - 35400-000, Ouro Preto, MG
leonardo@em.ufop.br

Resumo. Estudos sobre a tenacidade a fratura de aços ferríticos, normalmente utilizados na fabricação de vasos de pressão, apresentam uma grande dispersão nos resultados, quando avaliados na região de transição dúctil-frágil. A ASTM propôs uma nova metodologia (chamada Curva Mestra) que caracteriza estatisticamente o comportamento à fratura dos aços ferríticos na região de transição, através de um parâmetro denominado Temperatura de Referência (T_0). Neste trabalho foi aplicada a metodologia da Curva Mestra para caracterizar o comportamento na transição de um aço DIN15Mo3 normalizado e tratado termicamente, simulando uma Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Palavras Chaves: temperatura de referência, transição dúctil-frágil, tenacidade à fratura.

1. Introdução

Estudos sobre a tenacidade à fratura dos aços ferríticos mostram uma grande dispersão dos resultados quando avaliados na região de transição dúctil-frágil. Esta dispersão é fortemente influenciada pela temperatura de ensaio, dimensões e geometria dos corpos-de-prova e também pelo nível de restrição plástica na ponta da trinca.

Tais fatores dificultam a previsão de valores de tenacidade à fratura de aços ferríticos para aplicações em casos práticos. Uma forma de contornar essa dificuldade é através do uso das Curvas de Referência, descritas no Código ASME (*American Society of Mechanical Engineers*) (ASME, 1992). Estas curvas representam envoltórias inferiores de valores de tenacidade à fratura obtidos a partir de ensaios envolvendo diversos tipos de aços. Portanto, os valores de tenacidade estabelecidos por essas curvas são, em geral, muito conservadores.

Assim, foi proposta e aprovada pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) (ASTM, 1997) uma nova metodologia, chamada Curva Mestra, que trata estatisticamente o comportamento à fratura dos aços ferríticos na região de transição e caracteriza um material em particular, através de um parâmetro denominado Temperatura de Referência (T_0).

Neste trabalho foi aplicada a metodologia da Curva Mestra objetivando a determinação da Temperatura de Referência (T_0) do aço DIN 15Mo3 normalizado e tratado, simulando uma Zona Termicamente Afetada (ZTA).

2. Abordagem da Curva Mestra

A Curva Mestra é matematicamente expressa pela Eq. (1), e representa uma abordagem alternativa às Curvas de Referência apresentadas pelo código ASME (ASME, 1992).

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

Por essa equação, caracteriza-se o comportamento mediano dos valores de tenacidade à fratura na região de transição, expressos em termos do fator de intensidade de tensão equivalente ($K_{JC,med}$). A Temperatura de Referência (T_0) determina o posicionamento da curva onde o valor mediano da tenacidade à fratura ($K_{JC,med}$), em corpos-de-prova de espessura unitária, é $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

8918

PRODUÇÃO TÉCNICO CIENTÍFICA
DO IPEN
DEVOLVER NO BALCÃO DE
EMPRESTIMO

A importância dessa curva se traduz na possibilidade do posicionamento dos valores de tenacidade sem o uso das correlações empíricas, apresentadas pelo código ASME (ASME, 1992). Também, a dispersão de resultados tratada estatisticamente pela Distribuição de Weibull permite estabelecer limites de confiança para os valores medianos de tenacidade.

O princípio da Curva Mestre é baseado em 3 premissas: (1) os efeitos de tamanho são devidos ao princípio do “elo-mais-fraco” (serve para normalizar os valores de tenacidade para uma espessura “de referência” ou unitária); (2) a distribuição de Weibull, com o expoente “m” igual a 4, serve para descrever/ajustar os valores medidos para todos os aços ferríticos e (3) uma única expressão serve para descrever toda a transição.

O procedimento para determinação da Curva Mestre e da Temperatura de Referência (T_0) foi recentemente estabelecido pela norma ASTM E1921-97 (ASTM, 1997), onde se assume que a fratura ocorre por clivagem. Para validação dos resultados, são considerados limites de deformação e/ou plastificação máximas através da imposição de um valor limite para tenacidade ($K_{JC,lim}$):

$$K_{JC,lim} = \sqrt{\frac{\sigma_{YS} E b_0}{M}} \quad (2)$$

onde, σ_{YS} é o limite de escoamento do material na temperatura de teste, b_0 é o ligamento remanescente dado por $(W-a)$, W é a largura do corpo-de-prova, a é o comprimento da trinca, E é o Módulo de Elasticidade e M é uma constante para garantir a restrição plástica na ponta da trinca.

Segundo a norma, todos os resultados de tenacidade à fratura (K_{Bx}) devem ser obtidos para uma única temperatura de teste (T), estimada pela Eq. (3), e associados a um tamanho unitário de corpo-de-prova (B_{1T}), que pode ser convertido para diferentes espessuras através da Eq. (4). A Eq. (3) é uma sugestão para estimativa da temperatura de teste, que deve ser o mais próximo possível da Temperatura de Referência T_0 .

$$T = T_{28J} + C \quad (3)$$

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

onde, T_{28J} é a temperatura correspondente a absorção de 28 J (em um ensaio Charpy), C é uma constante dependente da espessura do corpo-de-prova, B_{xT} é a espessura do corpo-de-prova e K_{min} é um valor limiar de tenacidade à fratura e corresponde a um valor de 20 MPa \sqrt{m} , conforme a norma ASTM E1921-97 (ASTM, 1997).

Para a determinação da Temperatura de Referência, seguem-se então os procedimentos descritos na norma ASTM E 1921-97 (ASTM, 1997), que podem ser resumidos nas seguintes etapas:

1ª Etapa: Determinação da Temperatura de Ensaio.

Através da Eq. (3) e do levantamento da curva de transição do material (Energia de impacto Charpy vs. Temperatura), determina-se a temperatura de ensaio (T) que será empregada nos ensaios para a determinação da tenacidade à fratura.

2ª Etapa: Determinação de K_{JC} .

Para cada corpo-de-prova, realizam-se ensaios para medição da tenacidade à fratura, conforme norma ASTM E 1820-96 (ASTM, 1996). No caso de corpos-de-prova do tipo SE(B) as equações para cálculo de K_{JC} são:

$$J_C = J_e + J_p \quad (5)$$

$$J_e = \frac{K_e^2}{E} \quad (6)$$

$$K_e = \left[\frac{P S}{\left(\frac{B \cdot W}{3/2} \right)} \right] \cdot f \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (7)$$

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right)^{1/2} \left\{ 1,99 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \left[2,15 - 3,93 \left(\frac{a_0}{W}\right) + \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 \right] \right\}}{2 \cdot \left[1 + 2 \left(\frac{a_0}{W}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^{3/2}} \quad (8)$$

$$J_P = \frac{1,99 \cdot A_P}{B \cdot b_0} \quad (9)$$

$$K_{JC} = \sqrt{J_C \cdot E} \quad (10)$$

3ª Etapa: Determinação de K_0 .

Através da Eq.(11) e dos valores de K_{JC} determinados para cada corpo-de-prova, obtém-se o valor de K_0 :

$$K_0 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (K_{JC,i} - K_{\min})^4}{N - 0,3068} \right]^{1/4} + K_{\min} \quad (11)$$

4ª Etapa: Determinação do Valor Mediano de K_{JC} .

O valor mediano de K_{JC} ($K_{JC,med}$) é dado por:

$$K_{JC,med} = (K_0 - K_{\min}) \cdot 0,9124 + K_{\min} \quad (12)$$

5ª Etapa: Determinação da Temperatura de Referência (T_0).

A Temperatura de Referência é dada pela Eq. (13):

$$T_0 = T - \frac{1}{0,019} \cdot \ln\left(\frac{K_{JC,med} - 30}{70}\right) \quad (13)$$

3. Metodologia Experimental

O material estudado foi o aço DIN 15Mo3 normalizado com as características nominais mostradas na Tab. (1).

Tabela 1. Características Químicas e Mecânicas do Aço DIN15Mo3.

Composição Química ^(a)					Propriedades Mecânicas		
C	Mn	Si	P	Mo	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)	ΔL ^(b) (%)
0,18	0,72	0,31	0,024	0,27	282	438	28

(a). Po% em Peso (b). Base de Medida: 22 mm

A obtenção de corpos-de-prova com uma microestrutura similar à de uma zona termicamente afetada foi obtida a partir de uma metodologia para simulação de ciclos térmicos de soldagem realizada no material original (Rabello, 2000). Por essa metodologia, o material é tratado em um forno de indução eletromagnética e resfriado em um meio que permite reproduzir uma microestrutura similar à de uma zona termicamente afetada.

A metodologia experimental foi executada conforme as seguintes etapas:

- Tratamento térmico para simulação de uma ZTA;

- confecção de corpos-de-prova tipo Charpy;
- confecção de corpos-de-prova para Ensaio de Dobramento (3 pontos);
- realização de ensaios Charpy;
- realização de Ensaio de Dobramento;
- determinação de K_{JC} ;
- ajuste dos resultados pela Distribuição Estatística de Weibull;
- determinação da Temperatura de Referência (T_0);
- construção da Curva Mestre.

Após a obtenção da Curva de Transição Dúctil-frágil, pode-se definir a temperatura dos Ensaio de Dobramento (T) para a determinação dos valores de tenacidade à fratura, K_{JC} . Nessa etapa, foram utilizados corpos-de-prova com dimensões reduzidas (10x10x55 mm), divididos em seis amostras, contendo 10 corpos-de-prova cada uma. As amostras normalizadas foram identificadas como A, B, C, enquanto as amostras tratadas termicamente foram identificadas como D, E, F.

Como foram utilizados corpos-de-prova com dimensões reduzidas (com a relação a/W igual a 0,5), os resultados de tenacidade foram convertidos para a espessura unitária (1T), conforme Eq. (4), e linearizados pela Distribuição de Weibull, afim de se verificar a adequação estatística da dispersão e a aplicabilidade da Metodologia da Curva Mestre.

Em seguida, pode-se determinar a Temperatura de Referência (T_0) e construir a Curva Mestre para cada amostra, conforme procedimentos da norma ASTM E1921-97 (ASTM, 1997), descritos resumidamente na seção 2 do presente trabalho.

4. Resultados e Discussão

Ensaio Charpy. A Fig. (1) apresenta as Curvas de Transição Dúctil-frágil obtidas para o Aço DIN15Mo3 normalizado e tratado termicamente, simulando uma ZTA.

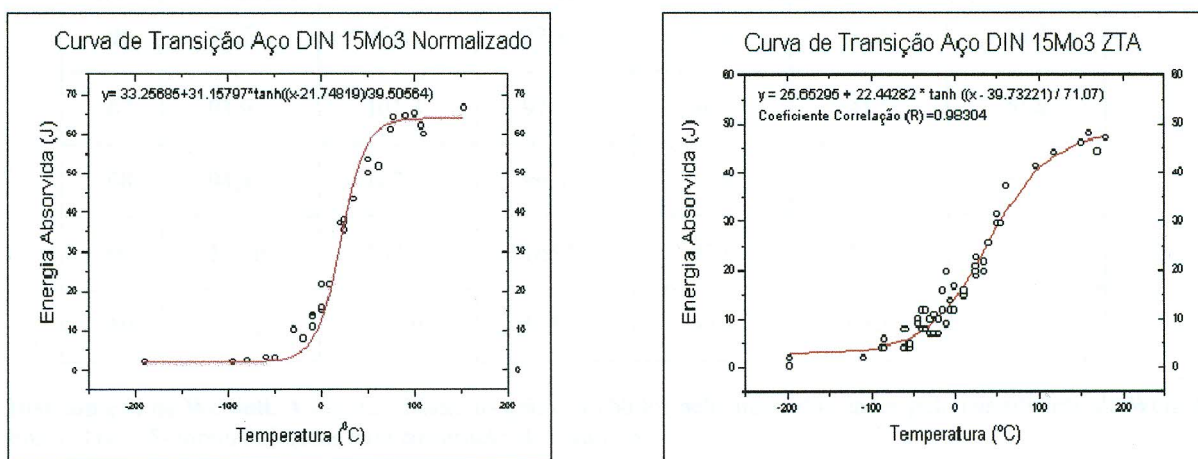


Figura 1. Curvas de Transição para o Aço DIN15Mo3 Normalizado e Simulando uma ZTA.

Através das expressões de ajuste, determinou-se o valor de T_{28J} , e posteriormente calculou-se o valor da temperatura de ensaio (T). Os valores de T para cada condição de tratamento térmico estão apresentados na Tab. (2). Foi utilizado o valor de -50 para a constante (C), presente na Eq. (3), conforme a norma ASTM E 1921-97 (ASTM, 1997).

Tabela 2. Cálculo da Temperatura de Ensaio (T).

Tratamento Térmico	T_{28J} (°C)	T (°C)
Normalizado	15,0	-35
ZTA	47,2	-3

Ensaio de Dobramento. A Tab. (3) mostra os valores de K_{JC} obtidos através de Ensaio de Dobramento nas 6 amostras.

Uma grande dispersão dos valores de K_{JC} foi observada em cada amostra, devido ao uso de corpos-de-prova com dimensões reduzidas. No caso, foram construídos gráficos da Distribuição de Weibull para verificar a adequação estatística dos valores.

Tabela 3. Valores de Tenacidade por Amostra.

CP's	K_{JC} (MPa√m)					
	Amostra A	Amostra B	Amostra C	Amostra D	Amostra E	Amostra F
01	57,0	60,7	61,4	76,8	51,8	59,4
02	75,2	71,1	64,3	35,6	55,3	45,6
03	75,8	80,9	74,2	41,7	38,0	68,2
04	84,6	93,3	81,1	57,7	50,0	45,1
05	86,6	96,7	85,5	53,9	41,0	48,1
06	93,7	97,8	92,3	58,8	37,5	60,2
07	93,9	101,3	97,5	46,7	41,5	61,8
08	94,8	102,1	99,8	54,9	42,3	37,9
09	101,0	104,2	105,0	52,1	54,2	40,4
10	119,2	107,0	113,5	49,9	63,5	45,3

Distribuição de Weibull. A Fig. (2) mostra os gráficos obtidos pelo ajuste dos dados pela Distribuição de Weibull. As Eqs. (14) e (15) foram utilizadas para construção dos gráficos:

$$1 - P_f = \exp \left[- \left(\frac{K_{JC} - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}} \right)^m \right] \tag{14}$$

$$P_f = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \tag{15}$$

onde, P_f é a probabilidade de falha acumulada, “m” é a inclinação da reta e K_{\min} corresponde a um valor de 20 MPa√m.

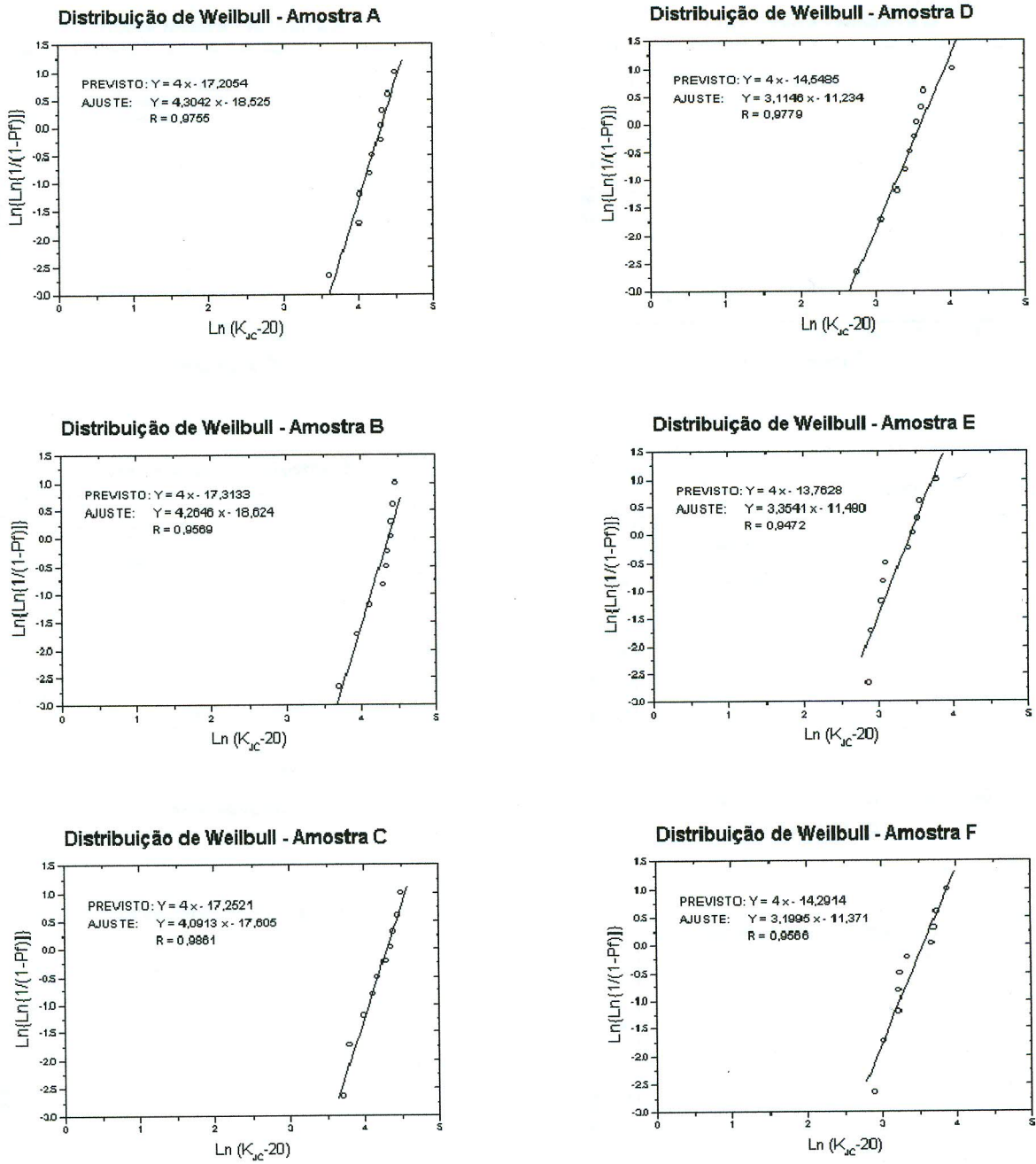


Figura 2. Distribuição de Weibull para as amostras.

Curva Mestra. A Fig. (3) apresenta as Curvas Mestras obtidas para cada amostra conforme Eq. (1).

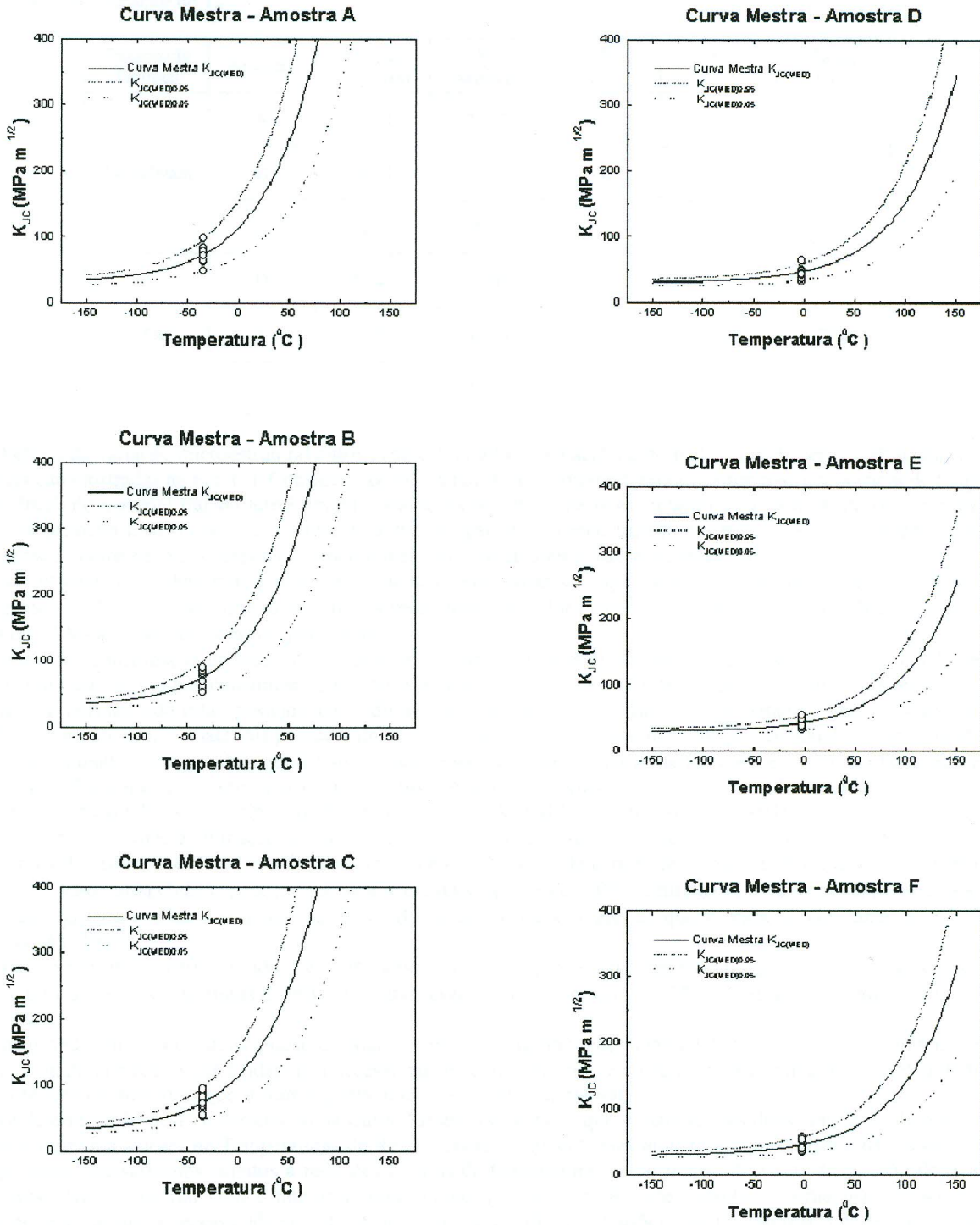


Figura 3. Curvas Mestras.

Determinação de T_0 . A Tab. (4) apresenta os valores da Temperatura de Referência (T_0) para cada amostra e o valor médio, calculado a partir das 6 amostras.

Tabela 4. Determinação de T_0 .

Tratamento Térmico	Amostra	$K_{JC(mod)}$ (MPa \sqrt{m})	K_0 (MPa \sqrt{m})	T (°C)	T_0 (°C)	$T_{0\ med}$ (°C)
Normalizado	A	73,31	78,42	-35	-9,7	-10,1
	B	74,71	79,96		-11,4	
	C	72,95	78,40		-9,3	
ZTA	D	47,42	50,05	-3	70,2	77,8
	E	42,52	44,68		87,6	
	F	45,71	48,18		75,6	

O efeito da variação microestrutural entre as amostras sobre a tenacidade do material pode ser percebida nas curvas de transição mostradas na Fig. (1). Considerando-se o valor de T_{28J} como referência, observa-se que a curva de transição dúctil-frágil do material tratado termicamente está deslocada para direita em relação à curva do material normalizado. Em uma primeira análise, tal fato representa a fragilização do material tratado em relação ao normalizado, o que é pertinente ao comportamento esperado para um material com uma microestrutura martensítica.

Nos ensaios para determinação de K_{JC} , pôde-se confirmar a fragilização do material tratado termicamente (simulando a ZTA), uma vez que as amostras apresentaram um valor médio de K_{JC} em torno de 45 MPa \sqrt{m} , contra um valor de 73 MPa \sqrt{m} das amostras normalizadas.

Uma outra confirmação do efeito da variação microestrutural entre as amostras, provocada pelas duas condições de tratamento térmico, é o posicionamento das retas ajustadas nos gráficos da Distribuição de Weibull. As retas relativas ao material normalizado estão posicionadas à direita das retas do material tratado termicamente. Isso significa que, na condição normalizada, os materiais possuem um comportamento mais tenaz, conforme já mencionado anteriormente.

Alguns trabalhos recomendam que a temperatura de teste (T) deva situar-se na faixa entre $\pm 20^\circ\text{C}$ da Temperatura de Referência (T_0) para se minimizar a dispersão dos resultados e fornecer uma maior confiabilidade no valor de T_0 determinado. Segundo os procedimentos descritos na norma ASTM E 1921-97 (ASTM, 1997), a seleção da temperatura de teste se faz mediante a aplicação da Eq. 3 que considera os resultados de testes de impacto e os efeitos da espessura dos corpos-de-prova, através do uso de uma constante (C). No caso de corpos-de-prova com dimensões reduzidas (tipo Charpy) o valor estabelecido pela norma para a constante (C) é de -50°C . Entretanto, evidências experimentais têm mostrado que para essa geometria de corpo-de-prova, o valor mais adequado para a constante é de -35°C (Brumovsky, 1999).

Observando os resultados obtidos nesse trabalho constata-se que esta recomendação é perfeitamente viável, pois no caso, a utilização de temperaturas de teste (T) mais elevadas (considerando $C = -35^\circ\text{C}$) as diferenças entre T e T_0 seriam menores.

Analisando, em particular, as amostras tratadas termicamente simulando uma ZTA, verifica-se que a diferença entre T e T_0 é muito elevada, o que evidencia a necessidade de outros fatores de correção para a aplicação da metodologia da Curva Mestra em materiais que sofram alguma modificação microestrutural.

Na determinação de T_0 e construção da Curva Mestra, constata-se que o material nas duas condições de tratamento térmico apresenta valores de Temperaturas de Referência relativamente elevados, o que inviabiliza o uso desse aço em componentes pressurizados sujeitos a reduções bruscas de temperatura, como o caso de vasos de pressão de reatores nucleares. Para o material com a microestrutura similar à de uma ZTA, esse aspecto se torna mais crítico, sendo portanto, evidenciada a necessidade de tratamentos térmicos de alívio de tensões e/ou revenimentos de regiões soldadas, em componentes fabricados por processos de soldagem.

5. Conclusões

Considerando-se a metodologia empregada, pode-se concluir que:

- A Temperatura de Referência (T_0) para o aço DIN15Mo3 normalizado possui um valor de $-10,1^\circ\text{C}$. Para o mesmo material, tratado termicamente simulando uma ZTA, a Temperatura de Referência foi de $77,8^\circ\text{C}$.

- O uso da Eq. 3 da norma ASTM E 1921-97 (ASTM, 1997) para a escolha da Temperatura de Teste (T) em corpos-de-prova com dimensões reduzidas deve ser revisto, considerando-se um novo valor para a constante (C).
- Estudos para a aplicação da metodologia da Curva Mestra em materiais tratados termicamente devem ser conduzidos de forma a se estabelecer parâmetros que considerem as modificações microestruturais sofridas pelo material.

6. Referências

- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XI, Rules for inservice inspection of nuclear power plant components, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1992.
- ASTM Test method for determination of the reference temperature, T_0 , for ferritic steels in the transition range. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. ASTM E1921-97. 1997.
- ASTM Standard Test method for measurement of fracture toughness. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. ASTM E1820-96. 1996.
- Rabello, E.G. *Determinação da temperatura de referência para um aço DIN15Mo3 normalizado e tratado termicamente, simulando uma ZTA*, Ouro Preto: UFOP, 2000. 105p. (Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia de Materiais).
- Brumovsky, M. *Results from the IAEA CRP on Master Curve application to reactor pressure vessel material testing*. Nuclear Research Institute REZ plc: Division of Integrity and Technical Engineering,. Czech Republic, 1999. 7p.

DETERMINATION OF REFERENCE TEMPERATURE (T_0) OF DIN 15Mo3 FERRITIC STEEL, NORMALIZED AND HAZ SIMULATED

Emerson Giovani Rabello

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN
Rua Prof. Mário Werneck, s/n - Pampulha - Caixa Postal 941 - 30123-970, Belo Horizonte, MG
egr@urano.cdtm.br

Julio Ricardo Barreto Cruz

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN
Rua Prof. Mário Werneck, s/n - Pampulha - Caixa Postal 941 - 30123-970, Belo Horizonte, MG
jrbc@cdtn.br

Leonardo Barbosa Godefroid

Escola de Minas - UFOP
Praça Tiradentes, 20 - 35400-000, Ouro Preto, MG
leonardo@em.ufop.br

Abstract

The characterization of the fracture behavior in the ductile-to-brittle transition for ferritic steels is a hard task because fracture toughness values exhibit extensive scatter and severe size and geometry effects. To overcome this problem in practice, the ASME Code has provided reference curves that give estimates of toughness versus temperature. These curves represent lower envelopes to a large set of fracture toughness experimental data for several heats of steel. Therefore, the fracture toughness values obtained from these curves are in general too conservative.

In the last decade, a new methodology, formalized in the ASTM standard method E1921-97, has revolutionized the approach used to characterize transition fracture behavior and has given a rationale for treating the several factors that influence the scatter in the results. Statistical models are used to define a transition curve, called Master Curve, and the transition temperature of a given material is stated by a parameter called Reference Temperature (T_0). In this work, the Master Curve approach is applied to characterize the transition behavior of DIN 15Mo3 steel.

Keywords. reference temperature, ductil-brittle transition, fracture toughness.