

# CURVAS DE CONFIABILIDADE NA DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA DE AÇOS FERRÍTICOS, NA TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL

**Carlos Alexandre de J. Miranda**

IPEN-CNEN/SP, Travessa R, 400.

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

## Resumo

A Temperatura de Referência,  $T_o$ , dos aços ferríticos posiciona a chamada Curva Mestra. Essa descreve a variação dos valores medianos de tenacidade à clivagem destes aços com a temperatura na região de transição onde não é possível definir um tamanho de corpo de prova que forneça um único valor de  $J_c$ . Cada ensaio de uma mesma geometria, tamanho de corpo de prova (CP) e temperatura de ensaio, fornece um valor diferente para  $J_c$  em uma larga faixa que é ainda maior quando são utilizados corpos de prova com espessura  $B < 25.4$  mm. Para obter  $T_o$  a norma ASTM E1921 exige, por exemplo, (a) trabalhar com valores do fator  $K$  equivalentes ( $K_{Jc}$ ) aos valores  $J_c$  medidos, (b) normalizar os valores medidos para uma espessura unitária e, principalmente, (c) utilizar pelo menos 6 valores válidos, obtidos em uma mesma temperatura de ensaio. Não há na norma ASTM nenhuma referência do grau de confiabilidade na determinação de  $T_o$ . Dada a natureza da Curva Mestra, os ensaios devem ser realizados na região de baixas temperaturas justamente onde as incertezas são maiores. Neste trabalho se apresenta uma família de curvas, obtida em simulações numéricas com o método Monte Carlo, que fornecem o nível de confiabilidade  $\mathcal{C}$  na determinação do parâmetro  $T_o$  em função da quantidade  $N$  de valores  $K_{Jc}$  disponíveis e da temperatura  $T$  de ensaio.

**Palavras-chave:** Mecânica da Fratura, Transição, Temperatura de Referência, Tratamento Estatístico, Confiabilidade.

## 1. INTRODUÇÃO

A Curva Mestra, originalmente proposta por Wallin [1991], descreve o comportamento do valor mediano ( $K_{Jc,med}$ ) de um conjunto de valores  $K_{Jc}$  associado a espessura unitária é definida pela temperatura de referência,  $T_o$ . A norma ASTM E1921 [1997] estabelece o número mínimo de 6 resultados válidos - valores experimentais de tenacidade à clivagem  $J_c$ , expressos em termos do fator intensidade de tensões equivalente,  $K_{Jc}$  - para a determinação da temperatura de referência de aços ferríticos,  $T_o$ . A composição química, o tratamento mecânico, o limite de escoamento do material ( $\sigma_{ys}$ ), o envelhecimento térmico e/ou a irradiação neutrônica não alteram a forma da curva, apenas a deslocam, isto é, alteram o valor  $T_o$  do material.

Kirk e Lott [1998] mostram que a Curva Mestra ajusta muito bem os valores  $K_{Jc}$  obtidos para várias geometrias, de uma variada gama de aços ferríticos, irradiados ou não, em uma larga faixa de temperaturas. Natishan e Kirk [1999] apresentam uma justificativa para a constância da forma da Curva Mestra, baseada nas equações constitutivas dos materiais.

Há situações em que não é possível dispor de todos os resultados necessários a aplicação da norma e ainda assim, se necessita caracterizar o material na transição. Para os casos extremos em que se dispõe de apenas um valor de tenacidade experimental, Landes e Sakalla [1997] sugerem um método alternativo para obter  $T_o$  a partir deste único resultado.

Para maiores detalhes a respeito desta norma ASTM E1921 ver [Miranda 1999, Miranda 2000] onde é feito um detalhado estudo da mesma, com exemplos de aplicação, suas recomendações, limites impostos, restrições, etc. Não há nenhuma indicação do nível (grau) de confiabilidade  $\mathcal{C}$  no valor de  $T_o$  determinado com o número mínimo (6) de valores  $K_{Jc}$  exigido pela norma ou no valor de  $T_o$  determinado a partir de uma quantidade diferente de resultados experimentais. Também não é possível, por essa norma, estabelecer ‘*a priori*’ o número de CPs que devem ser ensaiados, i. e: o número de resultados válidos que devem ser obtidos em uma dada temperatura, para que se tenha um certo grau de confiabilidade  $\mathcal{C}$  no valor de  $T_o$ .

Para definir as relações entre o nível de confiabilidade  $\mathcal{C}$  no valor de  $T_o$  e o número  $N$  de valores  $K_{Jc}$  “válidos” (número de ensaios), obtidos na temperatura de ensaio  $T$ , foram realizadas simulações numéricas utilizando o método Monte Carlo. Estas relações são apresentadas em forma de duas famílias de curvas que fornecem  $\mathcal{C}$  em função de  $N$  e de  $T$ .

## 2. A CURVA MESTRA

A Curva Mestre é definida pela eq. (1), onde  $K_{Jc,med}$  é associado a 50% de probabilidade de fratura. Pela norma E1921/97 são válidos os valores  $K_{Jc} \leq K_{Jc,limite}$ , eq. (2) onde  $\sigma_{ys}$ ,  $E$  e  $b_o$  são, respectivamente, o limite de escoamento e módulo de elasticidade do material e o ligamento remanescente do corpo de prova. O fator  $M = 30$  garante que o nível de plastificação na ponta da trinca seja limitado. A eq. (1) é baseada no princípio do elo-mais-fraco e na distribuição de Weibull de três parâmetros, eq. (3.a) e (3.b), sendo  $P_{f,i}$  a probabilidade acumulada de haver fratura por clivagem para um certo  $K_{Jc,i}$ .  $K_{min}$ ,  $m$  e  $K_o$  são fatores de ajuste da distribuição de Weibull. Dois desses parâmetros são fixos:  $m = 4$  e  $K_{min} = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

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

$$K_{Jc,limite} = \sqrt{\frac{\sigma_{ys} E b_o}{M}} \quad (2)$$

$$1 - P_{f,i} = \exp\left(-\left[\frac{K_{Jc,i} - K_{min}}{K_o - K_{min}}\right]^m\right) \quad (3.a) \quad P_{f,i} = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (3.b)$$

## 3. METODOLOGIA DA ANÁLISE

De acordo com o método Monte Carlo foram formados 30000 conjuntos com  $N$  valores  $K_{Jc}$  cada um, associados a uma temperatura de ensaio  $T$ , selecionados aleatoriamente a partir de um conjunto infinito - o “universo” de valores possíveis de tenacidade à clivagem. Esse “universo”, por sua vez, além de estar associado a uma temperatura de ensaio  $T$ , expressa em termos de  $(T-T_o)_u$ , ajusta-se perfeitamente a eq. (3). O procedimento da norma ASTM E1921 foi, então, aplicado a cada um desses conjuntos de  $N$  valores para obter a sua temperatura de referência  $T_o$ , em termos de  $(T-T_o)_s$ .

Cada conjunto produzirá um valor  $(T-T_o)_s$  diferente do valor ‘real’  $(T-T_o)_u$ . Os valores  $(T-T_o)_s$  associados aos conjuntos formam uma distribuição cuja mediana estará tão próxima

do valor ‘real’ quanto mais os conjuntos forem representativos do “universo” (i. e: do material na temperatura de ensaio). Assume-se como aceitáveis aqueles valores de  $(T-T_o)_s$  que estiverem na porção central da distribuição, definida com uma largura de  $\pm 10$  °C ( $\mathcal{L} = 10$  °C) em torno do valor  $(T-T_o)_u$ . Para isso, a distribuição foi dividida em três regiões: 1ª região:  $(T-T_o)_s - (T-T_o)_u < 10$  °C; 2ª região:  $|(T-T_o)_s - (T-T_o)_u| < 10$  °C; 3ª região:  $(T-T_o)_s - (T-T_o)_u > 10$  °C. O número relativo de valores  $(T-T_o)_s$  na 2ª região ou região central, define a probabilidade de se ter  $|(T-T_o)_u - (T-T_o)_s| \leq \mathcal{L} = 10$  °C.

Para os objetivos do presente trabalho, esta probabilidade define o nível de confiabilidade,  $\mathcal{C}$ , na determinação de  $T_o$ , utilizando N valores de  $K_{Jc}$  experimentalmente obtidos. A adoção desta faixa de  $\pm 10$  °C, em torno do valor teórico da distribuição, foi escolhida arbitrariamente e traduz um valor implicitamente adotado na norma ASTM E1921.

As análises foram realizadas em quatro etapas considerando 9 valores de  $(T-T_o)_u$ :  $\{-100, -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75, 100\}$ , em °C, e 12 valores de N:  $\{3, 4, 5, 6, 8, 10, 14, 20, 25, 35, 50, 100\}$ . Na etapa 1 é obtido o valor  $K_{o,u}$  que associa o universo de valores aleatórios com um dado  $(T-T_o)_u$ . Para obtê-lo foram utilizadas, de forma apropriada, as eq. (1) e (3.a), essa última fazendo  $P_f=50\%$  e  $K_{Jc}=K_{Jc,med}$ . Na etapa 2 é obtido cada conjunto com N valores  $K_{Jc,i}$  - para cada valor aleatório de probabilidade  $P_{f,i}$  ( $0 \leq P_{f,i} \leq 1$ ), a eq. (3.a) foi aplicada obtendo-se os respectivos valores  $K_{Jc,i}$  (usando o valor  $K_{o,u}$  da etapa 1). Os valores gerados são associados a espessura unitária, dessa forma nenhuma correção é feita nos mesmos.

Se os corpos de prova ensaiados tiverem espessura  $B_{xT}$  diferente da unitária ( $B_{1T}$ ), deve-se aplicar a eq. (4) para transformar os valores medidos em valores equivalentes associados com a espessura unitária, para calcular  $T_o$ .

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

Na etapa 3 é realizado o tratamento de cada conjunto gerado utilizando-se a eq. (5.a), para obter o respectivo parâmetro  $K_o$ , a eq. (3.a), com  $P_f=50\%$  e  $K_{Jc}=K_{Jc,med}$ , e a eq. (6), que é a eq. (1) escrita na ordem reversa. Assim, para cada conjunto se tem o respectivo valor  $(T-T_o)_s$ . Na etapa 4 é realizado o tratamento dos resultados - para cada valor de N existem 30000 valores de  $(T-T_o)_s$  para definir a respectiva distribuição.

Nas situações reais em que existam valores inválidos, deve-se utilizar a eq. (5.b) onde  $r$  é a quantidade de valores válidos.

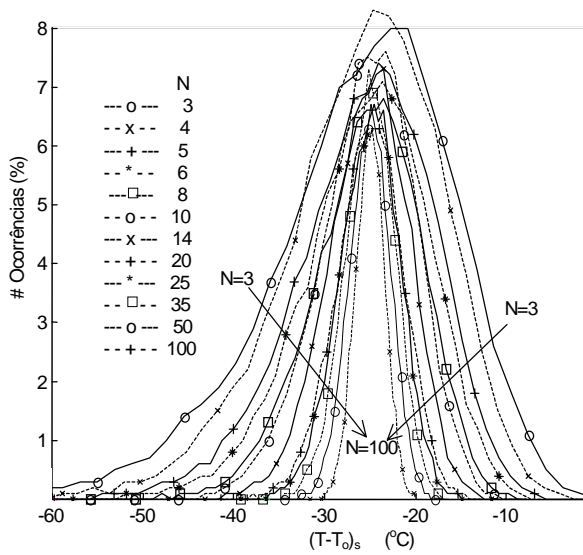
$$K_o = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (K_{Jc,i} - K_{\min})^4}{N - 0.3068} \right)^{1/4} + K_{\min} \quad (5.a) \quad K_o = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (K_{Jc,i} - K_{\min})^4}{r - 0.3068} \right)^{1/4} + K_{\min} \quad (5.b)$$

$$T_o = T - \frac{1}{0.019} \ln \left[ \frac{K_{Jc,med} - 30}{70} \right] \quad (6)$$

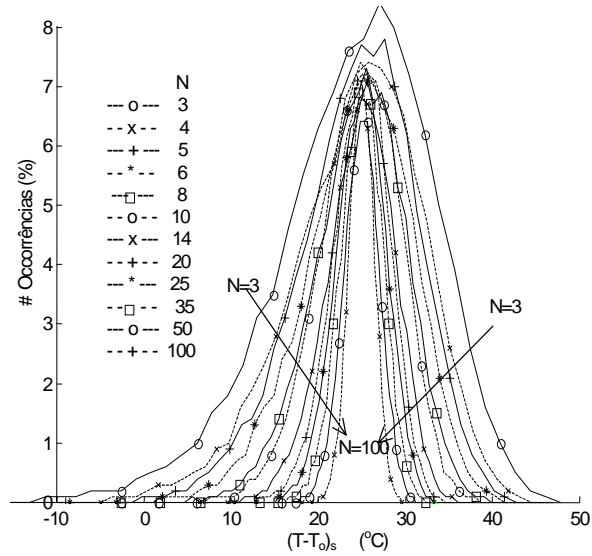
#### 4. RESULTADOS BÁSICOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As etapas 2 e 3 foram repetidas 30000 vezes para cada valor de N. As etapas 1, 2, 3 e 4 foram repetidas para cada valor de  $(T-T_o)_u$ . Assim, para cada valor  $(T-T_o)_u$ ,  $T_{ou}$ , e N foram obtidos 30000 valores  $(T-T_o)_s$ ,  $T_{os}$ , com os quais foram, por sua vez, obtidas as distribuições dos valores de  $(T-T_o)_s$  como aquelas típicas apresentadas nas figuras 1 e 2 para um mesmo  $(T-$

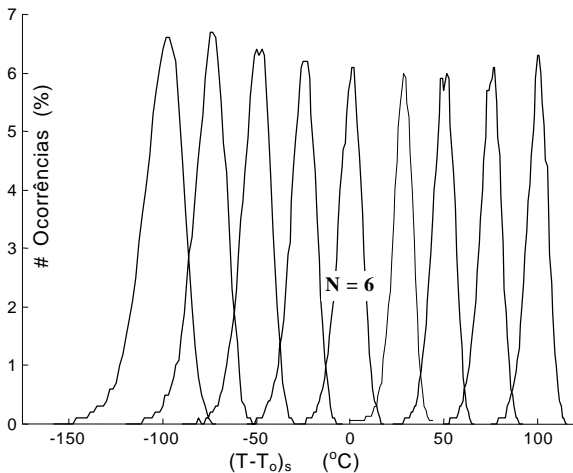
$T_{o,u}$  e nas figuras 3 e 4 para um mesmo valor N. As curvas com as contagens relativas em cada uma das suas três regiões foram, então, obtidas. A figura 5 apresenta as curvas "Contagem Relativa (%) versus N" para a região #2.



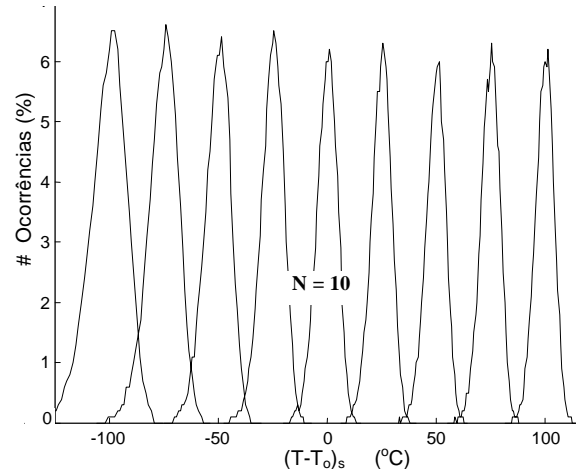
**Figura 1.**  $(T-T_o)_s$  para  $(T-T_o)_u = -25$  °C



**Figura 2.**  $(T-T_o)_s$  para  $(T-T_o)_u = +25$  °C



**Figura 3.** Distribuições de  $(T-T_o)_s$  - N = 6



**Figura 4.** Distribuições de  $(T-T_o)_s$  - N = 10

## 5. CURVAS "MÍNIMO N versus $(T-T_o)_u$ " E CURVAS " $\mathcal{C}$ versus $(T-T_o)_u$ "

A partir das hipóteses feitas e dos resultados apresentados anteriormente, principalmente fig. 5, foi obtida inicialmente uma família de curvas "Mínimo N versus  $(T-T_o)_u$ ", figura 6, associadas aos níveis de confiabilidade  $\mathcal{C} = 80\%$ ,  $90\%$ ,  $95\%$  e  $98\%$ . Embora calculado, o nível de confiabilidade  $\mathcal{C} = 70\%$  não é apresentado nesta figura, mas foi utilizado na determinação das curvas da figura 7. Com estas curvas é possível definir o número N mínimo de resultados "válidos" (Mínimo N ou MinN) que devem ser obtidos a uma dada temperatura  $(T-T_o)_u$ , para que se tenha um determinado nível de confiabilidade  $\mathcal{C}$  na obtenção de  $T_o$ .

Como exemplo de sua aplicação, na fig. 6 pode ser visto que, para se ter  $\mathcal{C} = 95\%$  no valor de  $T_o$ , quando os ensaios são realizados a  $(T-T_o)_u = -25$  °C, deve-se dispor de pelo menos 11 resultados válidos. Se os ensaios forem realizados a  $(T-T_o)_u = 0$  °C, isto é, na temperatura de referência, serão necessários pelo menos 10 resultados válidos para fornecer o

mesmo valor  $\mathcal{C}$ .

Em algumas situações, após os ensaios por exemplo, o número de resultados válidos é conhecido e se deseja ter o nível de confiabilidade  $\mathcal{C}$  associado ao valor determinado de  $T_0$ . Para esta situação foram obtidas as curvas " $\mathcal{C}$  versus  $(T-T_0)_u$ " apresentadas na figura 7.

## 6. INFLUÊNCIA DA LARGURA DA REGIÃO 2

Na norma ASTM E1921 [1997] há indicações de que os valores calculados de  $T_0$  devem estar na faixa de  $\pm 10$  °C em torno do valor esperado para levar em conta vários fatores como: a incerteza inerente aos testes realizados na região inferior da transição, onde a Curva Mestra, eq. (1), apresenta pouca inclinação; a incerteza quanto a influência do parâmetro  $K_{\min} = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ; a incerteza introduzida pela imposição do expoente  $m = 4$  da distribuição de Weibull, eq. (3), para conjuntos com poucos valores  $K_{Jc}$ . Este expoente tende para 4 a medida que o número de resultados aumenta, porém apresenta grande variabilidade quando o mesmo é calculado utilizando-se conjuntos com poucos valores [Wallin, 1984]

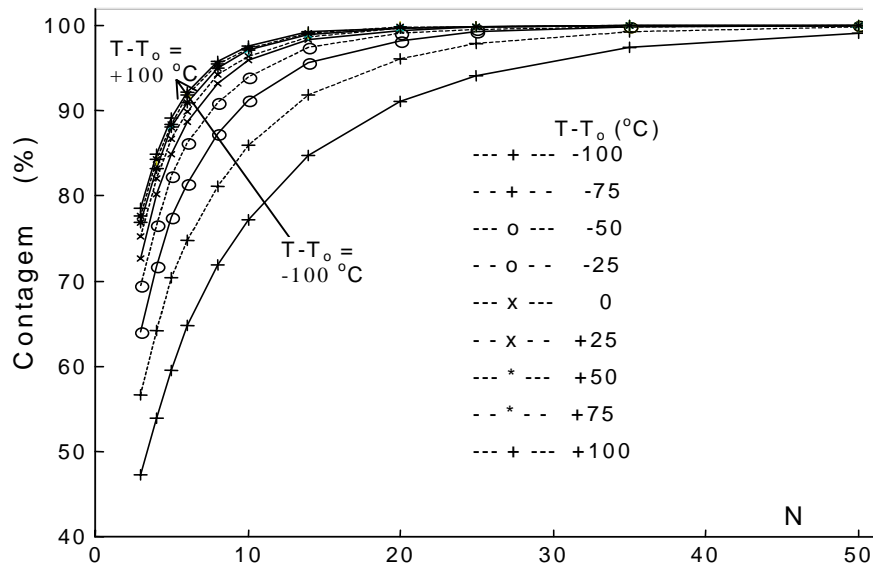


Figura 5. Contagem relativa na região #2

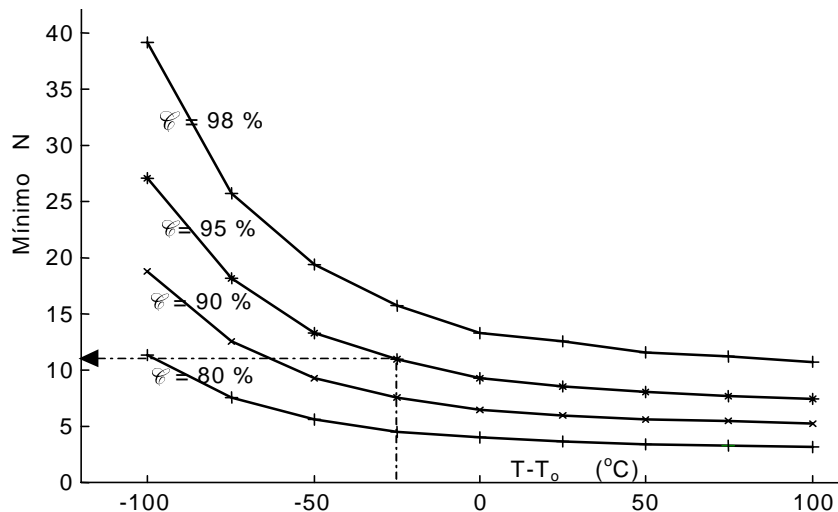
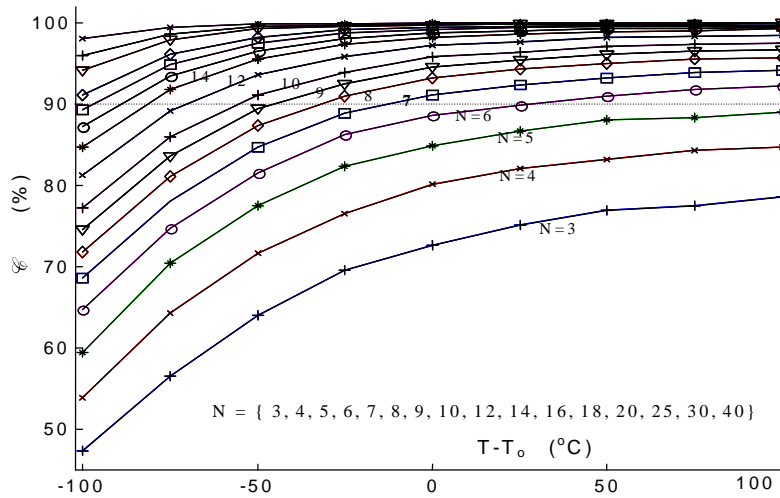


Figura 6. Curvas "Mínimo N x  $(T-T_0)_u$ " para um dado  $\mathcal{C}$



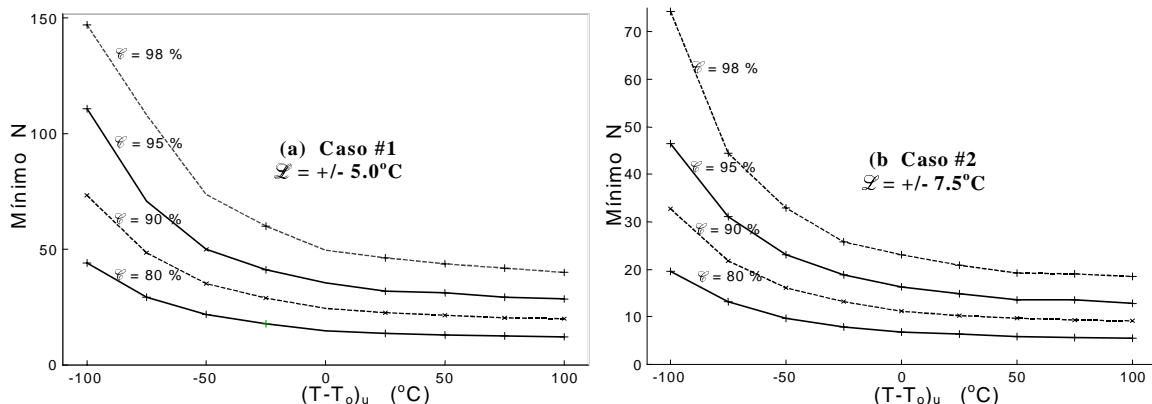
**Figura 7.**  $\mathcal{C}$  (%) para um dado  $N$  como função de  $(T-T_o)_u$

Nos resultados já obtidos considerou-se  $\mathcal{C}$  como a contagem (%) na região #2, com uma largura total  $2\mathcal{L} = 20$  °C. Assim, esse valor de largura ( $\mathcal{L}$ ) define a faixa de valores, centrada em  $T_{ou}$ , dentro da qual se admite que estejam os valores  $(T-T_o)_s$  relativos aos conjuntos  $(T_{os})$ , para levar em conta o natural espalhamento dos mesmos.

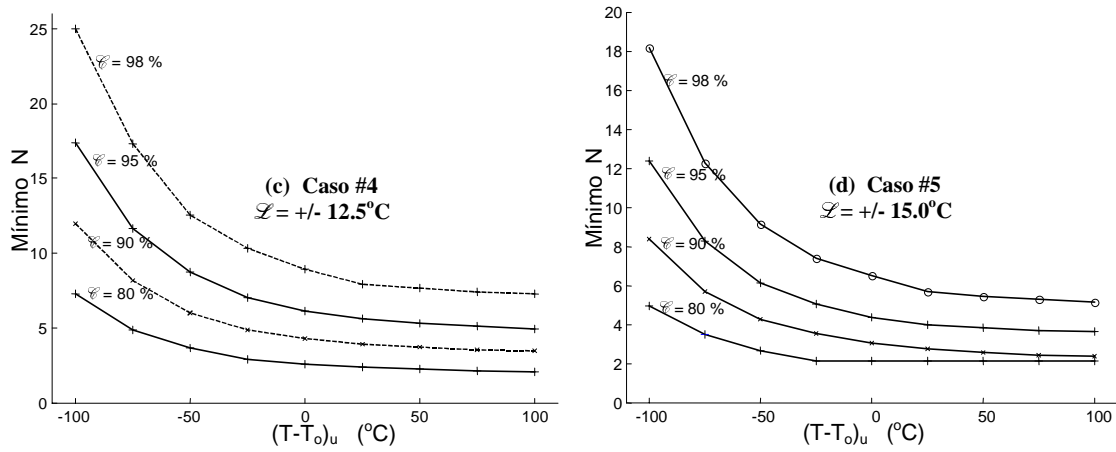
Nesta seção serão apresentados alguns resultados dos 5 casos estudados onde o valor da largura total da mencionada faixa variou de  $2\mathcal{L} = 10$  °C até  $2\mathcal{L} = 30$  °C:

- caso #1:  $2|T_{ou} - T_{os}| = 10$  °C ( $\mathcal{L} = 5.0$  °C);
- caso #2:  $2|T_{ou} - T_{os}| = 15$  °C ( $\mathcal{L} = 7.5$  °C);
- caso #3:  $2|T_{ou} - T_{os}| = 20$  °C ( $\mathcal{L} = 10.0$  °C);
- caso #4:  $2|T_{ou} - T_{os}| = 25$  °C ( $\mathcal{L} = 12.5$  °C);
- caso #5:  $2|T_{ou} - T_{os}| = 30$  °C ( $\mathcal{L} = 15.0$  °C)

O caso 3 corresponde aos resultados já apresentados. As análises seguiram a mesma metodologia já descrita e os resultados obtidos são apresentados apenas na forma das curvas “Mínimo  $N$  versus  $(T-T_o)_u$ ” nas figura 8.a e 8.b (para o caso #3 ver a figura 6). Para obter as curvas dos casos #4 e #5, foram gerados conjuntos com até 2 valores  $K_{Jc}$ . Em particular para o caso #5, figura 8.b, poderiam ter sido adotados conjuntos com apenas 1 valor de  $K_{Jc}$ , suficiente para atingir os níveis mais baixos de confiabilidade na determinação de  $T_o$ . Nos casos em que foram analisados conjuntos com apenas 2 valores  $K_{Jc}$ , utilizou-se 50000 conjuntos para obter as curvas das distribuições de  $(T-T_o)_s$ .

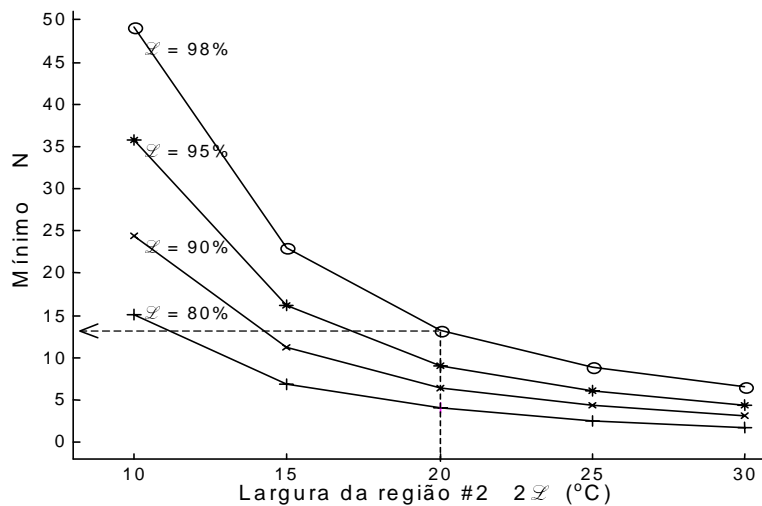


**Figura 8.a.** Curvas “Mínimo  $N$  x  $(T-T_o)_u$ ”, Casos #1 e #2



**Figura 8.b.** Curvas "Mínimo N x (T-T<sub>0</sub>)", Casos #4 e #5

A figura 9, obtida considerando a temperatura de ensaio igual a temperatura de referência i. e:  $T-T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ , mostra as curvas "Mínimo N versus  $\mathcal{L}$ ", com o valor  $\mathcal{L}$  entre  $5\text{ }^\circ\text{C}$  e  $15\text{ }^\circ\text{C}$ , associadas a  $\mathcal{C} = 80\%$ ,  $90\%$ ,  $95\%$  e  $98\%$ .



**Figura 9.** Influência de  $\mathcal{L}$  para obter um dado  $\mathcal{C}$  – para  $(T-T_0)_u = 0\text{ }^\circ\text{C}$

## 7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A norma E1921 [ASTM 1997] exige um mínimo de seis "resultados válidos" para a determinação de  $T_0$  embora não haja nenhuma indicação do nível de confiabilidade  $\mathcal{C}$  no valor determinado.  $\mathcal{C}$  varia com a temperatura  $T$  do ensaio e a quantidade  $N$  de resultados experimentais válidos disponíveis. Nas análises feitas os conjuntos de valores  $K_{Jc}$ , gerados aleatoriamente, são obtidos de "universos" que atendem perfeitamente a distribuição de Weibull de três parâmetros e, quando um dado conjunto apresentava  $K_{Jc,med} < 30\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , o mesmo era descartado e um novo conjunto era gerado. Esse fato indica que o conjunto de valores gerados está no, ou muito próximo do, patamar inferior e ocorreu em menos de 1% dos conjuntos associados a  $(T-T_0)_u = -100\text{ }^\circ\text{C}$  e para cerca de 10 conjuntos associados a  $(T-T_0)_u = -75\text{ }^\circ\text{C}$ .

Como esperado, as distribuições de  $(T-T_o)_s$  mostram que a dispersão dos valores obtidos diminui a medida que aumenta o número de valores  $K_{Jc}$  que formam os conjuntos e, menos acentuadamente, a medida que aumenta a temperatura  $(T-T_o)_u$ . A 3ª região da distribuição de  $(T-T_o)_s$  poderia ser considerada na definição do nível de confiabilidade, uma vez que está associada a uma estimativa conservadora da tenacidade à clivagem. Se a região #3 fosse incluída, o número de resultados válidos necessários para fornecer um dado nível de confiabilidade  $\mathcal{C}$ , seria reduzido. Essa inclusão faria aumentar  $\mathcal{C}$  para aqueles conjuntos com, em média, menos do que 7 (sete) valores  $K_{Jc}$ . Essa opção não foi adotada para que as curvas obtidas tivessem algum grau de conservadorismo.

Como as curvas das figuras 6 e 7 mostram, não há grande vantagem em realizar ensaios na região  $(T-T_o)_u > 50$  °C, uma vez que as curvas de confiabilidade se tornam quase horizontais. E, como a Curva Mestra não define o fim da transição, existe a possibilidade de que alguns resultados (ou todos) apresentem fratura típica do patamar superior: fratura dúctil ou colapso plástico. Combinando o limite imposto pela eq. (2) com o fato da tenacidade à clivagem crescer exponencialmente com a temperatura, é maior a possibilidade de se obter muitos valores inválidos para determinar  $T_o$ . Assim, se desaconselha realizar ensaios na região onde  $(T-T_o)_u > 25$  °C. O comportamento das curvas obtidas, na região onde  $T < T_o$ , fig. 6 e 7, está diretamente associado com o fato da Curva Mestra apresentar pouca inclinação nesta região. Uma pequena variação no valor  $K_{Jc}$  medido implica uma forte variação da temperatura  $T_o$  associada. Assim, para garantir bons níveis de confiabilidade  $\mathcal{C}$ , é recomendável que os ensaios não sejam realizados na região onde  $(T-T_o) \leq -25$  °C.

Portanto, em uma primeira análise dos resultados das simulações feitas, a melhor faixa de temperaturas  $T$  para a realização de ensaios para determinar  $T_o$  é  $-25$  °C  $\leq (T-T_o) \leq 25$  °C. Lembrando que para obter a Curva Mestra os valores  $K_{Jc}$  são associados a espessura unitária,  $B = 1T$ , esses limites mudarão de acordo com a geometria ensaiada e o seu tamanho ( $B$ ).

A partir dos resultados apresentados observa-se que, utilizando-se 6 valores  $K_{Jc}$  válidos, se pode ter menos do que 90% de confiabilidade na determinação de  $T_o$  quando a temperatura de ensaio ( $T$ ) é a mesma que a temperatura de referência  $T_o$ , i.e: quando  $(T-T_o)_u = 0$  °C. Para esse valor de  $(T-T_o)_u$  cerca de 12 resultados são necessários para termos 95% de confiabilidade na determinação de  $T_o$ . Com apenas 6 resultados, o nível de confiabilidade na determinação de  $T_o$  será maior do que 90% somente quando os ensaios forem realizados em temperaturas acima de  $(T-T_o)_u = 25$  °C. Isso significa obter valores  $K_{Jc}$  maiores e, portanto, maior risco de se ter muitos valores não-válidos.

A região de superposição de duas curvas de distribuições de  $(T-T_o)_s$  adjacentes cresce a medida que  $N$  diminui e que o valor  $(T-T_o)_u$  é menor, conforme indicado nas fig. 3 e 4. Como se sugere que os ensaios não sejam realizados na região em que  $(T-T_o)_u < -25$  °C essa superposição não chega a ser um problema para este estudo.

O comportamento das curvas apresentadas está diretamente relacionado com a definição da Curva Mestra. Os resultados obtidos estão diretamente associados com a hipótese de que a confiabilidade  $\mathcal{C}$  na determinação de  $T_o$  é traduzida pela probabilidade de um valor de  $T_o$  estar na região central das distribuições de  $(T-T_o)_s$ , onde  $|(T-T_o)_u - (T-T_o)_s| \leq \mathcal{L} = 10$  °C. Para se obter um mesmo valor de confiabilidade  $\mathcal{C}$  no valor determinado para  $T_o$ , se a largura desta faixa,  $\mathcal{L}$ , for reduzida/aumentada o número de valores  $K_{Jc}$  válidos necessários (ou, em outras palavras, o número de corpos de prova a serem ensaiados) aumentará/diminuirá.

Observa-se, como esperado, uma forte influência da largura  $\mathcal{L}$  na confiabilidade  $\mathcal{C}$  do valor obtido para  $T_o$ . Pelos resultados apresentados, fig. 9, e considerando a temperatura de ensaio ( $T$ ) igual a temperatura de referência ( $T_o$ ), para  $\mathcal{L} = 10$  °C – faixa central com largura total de 20 °C – necessita-se de cerca de 14 valores experimentais para se ter confiabilidade  $\mathcal{C} = 98\%$  no valor de  $T_o$ .



Para se ter  $\mathcal{C} = 95\%$  são necessários, no mínimo, cerca de 10 valores experimentais. Utilizando seis valores experimentais tem-se  $\mathcal{C} \approx 90\%$  associado ao valor determinado para  $T_0$ . Considerando apenas seis valores  $K_{Jc}$  experimentais “válidos”, para que se tenha entre 95% e 98% de confiabilidade  $\mathcal{C}$  no valor  $T_0$  determinado, deve-se admitir uma faixa com 25 °C de largura total ( $\mathcal{L} = 12.5$  °C) em torno do valor esperado.

## 8. REFERÊNCIAS

- ASTM E1921, 1997. *Test Method for Determination of the Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range*. American Society for Testing and Materials.
- Kirk, M. T., Lott, R., 1998. *Empirical Validation of the Master Curve for Irradiated and Un-Irradiated Reactor Pressure Vessels*. In: 1998 ASME/JSME Pressure Vessel and Piping Conference, July 27-30, San Diego, CA.
- Landes, J. D.; Sakalla, K. 1997. *Single Specimen Method for Determining the Master Curve in the Transition*. In: Fatigue and Fracture Mechanics, 28<sup>th</sup> Volume, American Society for Testing and Materials, ASTM STP 1321.
- 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., 2000. *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.
- Natishan, M. E.; Kirk, M. T., 1999. *A Physical Basis for the Master Curve*. In: 1999 ASME Pressure Vessel and Piping Conference, August 1-5, Boston, MA.
- Wallin, K., 1984. *The Scatter in  $K_{IC}$  Results*, Engineering Fracture Mechanics. v. 19, p. 1085-1093.
- Wallin, K., 1991. *Fracture Toughness Transition Curve Shape for Ferritic Structural Steels*. In: Joint FEFG/ICF International Conference on Fracture of Engineering Materials, Singapore, August 6-8, p. 83-88.