

# AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INTEGRAL J EM AÇOS DE USO ESTRUTURAL – NOVOS PROCEDIMENTOS E METODOLOGIAS

**Carlos Tasso E. DeAquino**

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica  
Departamento de Engenharia de Materiais, Cx. P. 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

**Carlos Alexandre de J. Miranda**

IPEN/CNEN-SP – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Travessa R, 400, Cidade Universitária 05598-900 – São Paulo, SP, Brasil

***Resumo.** Códigos de projeto e normas para a realização de ensaios de caracterização de materiais são instrumentos imprescindíveis para a obtenção de um projeto seguro e de alta confiabilidade. No entanto, a forma como estes documentos costumam estar estruturados pode ocasionar confusão e dúvida ao profissional encarregado de sua aplicação. O objetivo deste trabalho é o de apresentar, sob um enfoque didático e crítico, os novos procedimentos de ensaio desenvolvidos pela ASTM nos últimos 2 anos para a obtenção da integral J, as normas E1737, E1820 e E1921, apontando eventuais dificuldades em sua aplicação.*

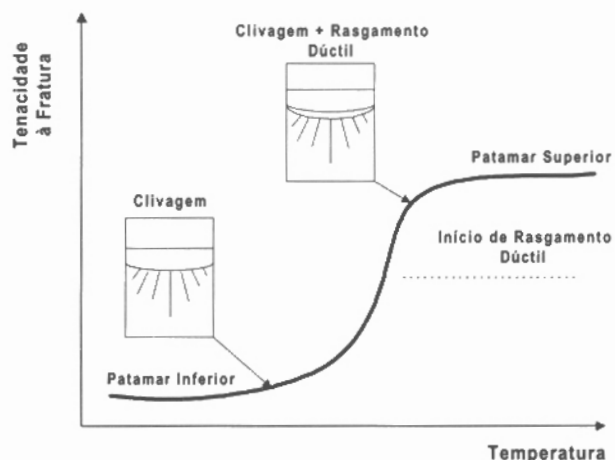
***Palavras-chave:** Mecânica da Fratura, Integridade Estrutural, Propriedades Mecânicas, Materiais Metálicos*

## 1. INTRODUÇÃO

Até meados da década de 90, dois procedimentos de ensaios normalizados pela ASTM, *American Society for Testing and Materials*, tratavam da obtenção experimental do valor da integral J como parâmetro caracterizador da tenacidade à fratura em regime elasto-plástico. Uma delas, a E813 (ASTM, 1995), inicialmente publicada em 1981, descrevia uma metodologia de ensaio para estimar  $J_{IC}$  ou seja, o valor crítico de J próximo à iniciação de crescimento de trinca dúctil. A norma E1152 (ASTM, 1995), inicialmente publicada em 1987, apresentava a metodologia para a obtenção da curva de resistência J-R, representando a variação do valor de J em função de um incremento no tamanho da trinca,  $\Delta a$ .

As normas acima descritas para a caracterização à tenacidade à fratura baseadas em J, para materiais metálicos estruturais que apresentavam uma transição dúctil-frágil, tinham seu escopo de utilização limitado a uma região de patamar superior (Fig.1), onde o comportamento do material era iminentemente dúctil. O motivo para tal era muito mais histórico e político do que técnico. A não aplicação do conceito de J para situações em que o mecanismo de fratura fosse frágil (normalmente a clivagem em aços estruturais) devia-se muito mais ao fato de que tal parâmetro fora desenvolvido pensando-se nas aplicações nucleares da década de 70, para as quais desconsiderava-se a capacidade dos materiais de se

deformarem plasticamente, com os ensaios e o dimensionamento de estruturas totalmente baseados na Mecânica da Fratura Elástica Linear.



**Figura 1 - Comportamento à Fratura de Aços Estruturais**

Com o desenvolvimento de novas técnicas, o aprimoramento dos conhecimentos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) e uma preocupação maior com a degradação dos materiais ao longo de sua vida útil, o que levava o material a apresentar um comportamento típico da região de transição dúctil-frágil, foi constatada a necessidade de se proceder a uma atualização das normas E813 e E1152, que tratavam da fratura baseada em J.

No caso particular da ASTM, seus processos tradicionais de incorporação de alterações técnicas (aprovação por unanimidade) em seus procedimentos normalizados, denominados *standards*, fazem com que qualquer mudança demore muito para ser realizada, apesar de dominadas novas tecnologias. Nos anos de 1997 e 1998, os novos *standards* foram finalmente publicados no *ASTM Annual Book of Standards*, sob as denominações de E1737, E1820 e E1921. O objetivo deste trabalho é o de apresentar, de forma resumida, porém didática, as características gerais de cada uma desses documentos. A tabela 1 apresenta as principais mudanças introduzidas na obtenção experimental da integral J, após a entrada em vigência dessas normas, incluindo alterações ocorridas na obtenção da tenacidade à fratura através de outros parâmetros.

**Tabela 1 – Novos procedimentos normalizados - principais alterações introduzidas**

	Situação Anterior	Situação Atual
1. Obtenção de $J_{IC}$	E813	E1737, E1820
2. Obtenção da Curva J-R	E1152	E1737, E1820
3. Obtenção de CTOD	E1290	E1290, E1820
4. Obtenção de $K_{IC}$	E399	E399, E1820
5. Obtenção de J de clivagem	N/D	E1820, E1921
6. Obtenção da Curva Mestre de tenacidade na transição	N/D	E1921

Obs:

- As normas E813 e E1152 foram unificadas em um único documento, a E1737
- A norma E1820 engloba o contexto das normas E399, E813, E1152 e E1290
- As normas E813 e E1152 foram canceladas nos anos de 1998 e 1997, respectivamente.

## 2. A NORMA COMBINADA DE J (ASTM E1737)

### 2.1 Introdução

Uma nova norma combinada para ensaios de J, que incorpora o procedimento para a realização do ensaio para obtenção da curva J-R à análise do ponto correspondente ao início do crescimento de trinca estável,  $J_{IC}$ , denominada *E1737 – Standard Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness* (ASTM, 1997), foi pela primeira vez publicada pela ASTM no ano de 1997. Trata-se, de uma maneira geral, de uma versão combinada das normas E813 e E1152 (ASTM, 1995), que tratavam, de maneira individual, da obtenção de  $J_{IC}$  e da construção da curva J-R, respectivamente. A grande novidade introduzida na E1737 foi a possibilidade de se caracterizar um valor de tenacidade à fratura baseado em J ( $J_C$ ), para uma situação de uma fratura frágil por clivagem.

A definição de regras para a obtenção de um valor de J de clivagem há muito já se mostrara necessário, visando principalmente a atender uma situação normalmente encontrada em aços ferríticos de aplicação estrutural, dentre os quais os aços ASTM A508 e ASTM A533B, largamente utilizados na indústria nuclear. Estes materiais, devido à degradação de suas propriedades mecânicas durante a sua vida útil, podem passar a trabalhar na transição. Nesta região entre os regimes de fratura inteiramente frágil e de fratura inteiramente dúctil, denominada de transição dúctil-frágil, é caracterizada pela ocorrência inicial de crescimento estável das trincas existentes antes do rompimento/fratura instável (por clivagem).

Devido à existência de uma região plástica considerável na ponta da trinca, a norma E399 (ASTM, 1995), aplicável à fratura frágil, não podia ser utilizada para a avaliação da tenacidade à fratura do material. Por outro lado, as normas anteriormente vigentes que tratavam de J não permitiam a obtenção de um J de clivagem, pelos motivos já citados na introdução deste trabalho. A publicação da ASTM E1737 veio, portanto, preencher uma lacuna importante existente na caracterização à fratura de materiais metálicos de aplicação estrutural.

### 2.2 Características gerais da norma

**Corpos de prova permitidos.** Na realização dos ensaios de tenacidade segundo a norma E1737, são aceitos os corpos de prova tipo compacto em tração, padrão [C(T)] e em forma de disco [DC(T)], e os de flexão [SE(B)].

**Tipos de fratura cobertos pela norma.** Na utilização da ASTM E1737, permite-se a obtenção da tenacidade à fratura, tanto para as situações de fratura com instabilidade (comportamento elástico-linear ou clivagem precedida de crescimento estável), como para o rasgamento dúctil com crescimento estável de trinca. Desta forma são cobertas as situações anteriormente suportadas pelas normas E813 e E1152, acrescidas das ocorrências de fratura na transição dúctil-frágil.

**Metodologia utilizada.** O procedimento considerado como mais adequado pela E1737 para a obtenção de  $J_{IC}$  ou da curva J-R é o do ensaio de um corpo de prova único, com o uso das técnicas de *unloading compliance* ou *electrical potential drop* para o acompanhamento da variação de crescimento da trinca. A alternativa da técnica de múltiplos corpos de provas associada ao processo de *heat-tinting* também é considerada aceitável para o cálculo de  $J_{IC}$ , mas não para o levantamento da curva J-R. Para o cômputo de  $J_{IC}$  deve ser utilizado um processo de inicialização do valor do comprimento inicial de trinca, conforme procedimento

descrito no documento e baseando-se em um ajuste de curva de um certo número de pontos levantados experimentalmente, não devendo ser utilizado o valor de  $a_0$  medido.

**Novas alterações da E1737.** Em 1999 o Comitê E08 da ASTM decidiu pelo cancelamento da E1737, visto que seu escopo está totalmente coberto pela E1820 (ASTM, 1997). Trata-se, assim, de uma das normas com a vida mais curta dentre aquelas já publicadas pela ASTM. Deve-se esclarecer que este fato decorre do tempo excessivo dispendido na aprovação final da E1737. A idéia inicial era a de que esta norma serviria como uma transição até a publicação de uma norma unificada de Mecânica da Fratura. Discussões excessivas dentro do comitê E08 da ASTM, levaram a que ambas as normas, E1737 e E1820, acabassem sendo publicadas no mesmo ano, tirando por completo a função da primeira.

### 3. NORMA UNIVERSAL DE TENACIDADE À FRATURA (ASTM E1820)

#### 3.1 Introdução

Um outro grupo também integrante do comitê E08 da ASTM, trabalhou na elaboração de uma norma universal de tenacidade à fratura denominada *E1820 - Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness* (ASTM, 1997), aprovada pela ASTM no ano de 1996.

A idéia por trás desta norma é a de evitar desperdícios hoje usuais na área de ensaios de Mecânica da Fratura, pelo fato de não se conhecer previamente o comportamento do material sendo ensaiado. Como exemplo do que hoje acontece, vejamos o caso do ensaio de um material do qual se espera um comportamento elástico linear. A norma anteriormente tratando desta situação seria a ASTM E399. Seguidas as regulamentações impostas por esta norma, com a escolha, por exemplo, de um corpo-de-prova tipo C(T), proceder-se-iam aos ensaios e, hipoteticamente, poder-se-iam obter resultados inválidos. Nesta situação, ter-se-ia que preparar novos corpos C(T) - de acordo com as normas E813 e E1152 e que são ligeiramente diferentes daqueles definidos pela E399, de forma a acomodar um posicionamento diferente dos *clip-gages* - para então obterem-se valores de  $J$ , que nos permitiriam avaliar a tenacidade em regime elasto-plástico. Como pode ser visto, este antigo procedimento causava um desperdício de tempo, material e, portanto, dinheiro no processo.

A filosofia da nova metodologia de ensaio da norma E1820 é a de adotar uma abordagem universal, considerando que todos os métodos anteriormente vigentes valiam-se essencialmente dos mesmos corpos-de-prova e de procedimentos similares, mas que o cálculo final da tenacidade à fratura era uma função tão somente do tipo de análise a qual os resultados dos testes estariam sujeitos.

Isto quer dizer que, em se utilizando a nova norma, um resultado de  $K_{Ic}$  poderia ser obtido para um comportamento essencialmente elástico linear do material ensaiado, da mesma forma que se os resultados dos ensaios demonstrassem um comportamento elasto-plástico, a tenacidade seria então calculada em termos da integral  $J$  ou de CTOD. Para sumariar, a nova norma não adota qualquer técnica nova para medição da tenacidade à fratura, mas tão somente combina de forma eficiente as técnicas já existentes nas normas E399, E813, E1152 e E1290 (ASTM, 1995), esta última relacionada ao cômputo da tenacidade à fratura em termos do CTOD, anteriormente vigentes.

Resta esclarecer que, apesar da existência da norma universal, algumas das antigas normas cujos procedimentos encontram-se incluídos no escopo da E1820 ainda não foram canceladas, quer por motivos históricos (E399 e E813), quer pela diferença de abordagem utilizada para tratar um mesmo problema (E1290)

A abordagem mais universal vem sendo adotada não somente pela ASTM como também por diversos organismos internacionais, que tratam da normalização de ensaios de Mecânica da Fratura, como a BSI (Inglaterra) e a ISO (*International Standards Organization*).

### 3.2 Características gerais da norma

**Corpos de prova permitidos.** Na realização dos ensaios de tenacidade segundo a norma E1820, são aceitos os corpos de prova tipo compacto em tração, padrão [C(T)] e em forma de disco [DC(T)], com a relação  $2 \leq W/B \leq 4$ , e os de flexão [SE(B)], com  $1 \leq W/B \leq 4$ , com W sendo a largura e B a espessura do corpo de prova.

**Tipos de fratura cobertos pela norma.** Na utilização da ASTM E1820, permite-se a obtenção da tenacidade à fratura, tanto para as situações de fratura com instabilidade (comportamento elástico-linear ou clivagem precedida de crescimento estável), como para o rasgamento dúctil com crescimento estável de trinca. Desta forma são cobertas as situações anteriormente suportadas pelas normas E399, E813, E1152, E1290, acrescidas das ocorrências de fratura na transição dúctil-frágil.

**Metodologia utilizada.** O procedimento descrito na E1820 para a obtenção da tenacidade à fratura sugere que sejam seguidas as seguintes etapas:

- a – realização de ensaios para a obtenção de conjuntos de valores de carga (P), deslocamento (v) e tamanho de trinca (a), sendo que estes últimos na primeira versão da norma, publicada em 1997, podiam ser obtidos a partir da aplicação das técnicas de *unloading compliance* ou *electrical potential drop*;
- b – os ensaios devem ser continuados até que ocorra a instabilidade na fratura ou seja obtida uma variação no tamanho da trinca inicial que permita a realização de análises para a obtenção da tenacidade;
- c – devem ser avaliados todos os possíveis parâmetros de fratura;
- d – para cada parâmetro de fratura escolhido (K, J ou CTOD) devem ser verificados critérios de validação. Se atendidos estes critérios o parâmetro é agora considerado *qualified* ou *size insensitive*.

**Novas alterações da E1820.** Atualmente o Comitê E08 da ASTM está julgando as novas alterações / inclusões que deverão constar de uma versão atualizada da norma unificada, a ser provavelmente publicada ainda este ano. Dentre elas merecem citação

- a – alteração nos requisitos de tamanho do corpo de prova;
- b – eliminação da técnica de *electrical potential drop*, como alternativa para a monitoração do crescimento de trinca;
- c – inclusão de um novo anexo, para tratar do caso de carregamentos rápidos, usando o método da normalização (Landes & Herrera, 1989).

## 4. NORMA DE CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS NA REGIÃO DE TRANSIÇÃO (ASTM E1921)

### 4.1 Introdução

A ASTM, aprovou em 1997 e publicou em 1998 uma norma que estuda o efeito de espalhamento dos resultados obtidos para obtenção de um valor de tenacidade à fratura para materiais metálicos na região de transição.

Mesmo tomando-se corpos de prova de mesma geometria, tamanho, e constituídos de uma mesma corrida de um determinado aço, caso sejam realizados ensaios seguindo-se os procedimentos definidos nas duas normas anteriormente descritas, a uma mesma temperatura dentro da região de transição dúctil-frágil, a relação entre o maior e menor valores de  $J$  de clivagem obtidos pode ser da ordem de 1:10. Por este motivo torna-se necessário o tratamento estatístico dos resultados, não sendo possível se chegar a um resultado único de tenacidade à fratura que seja representativo do material. A partir da análise de experimentos realizados no *Oak Ridge National Laboratory – ORNL* - (EUA) e no Laboratório Nacional da Finlândia (VTT), optou-se pela utilização da distribuição de Weibull (1951), que melhor se adapta ao princípio do elo-mais-fraco. A partir das ferramentas estatísticas desenvolvidas e da realização de um número reduzido de ensaios a uma dada temperatura dentro da região de transição, torna-se possível com o uso da ASTM E1921:

- a - a obtenção de uma temperatura de referência na transição, denominada  $T_0$ , baseada em resultados de ensaios de Mecânica da Fratura. Isto reduz o empirismo e conservadorismo em projetos de componentes industriais, visto que a temperatura de referência hoje adotada na seção XI do Código ASME (1998),  $RT_{NDT}$  é definida por uma combinação de critérios obtidos a partir do ensaio de queda de peso (*drop weight test*) e do ensaio de impacto Charpy;
- b – a obtenção de uma curva mestra de tenacidade à fratura para o material sendo ensaiado, representando a variação do valor mediano de tenacidade com a temperatura, para um corpo de prova com espessura  $1T$  (1 polegada ou 25,4 mm). Esta curva é indexada pela temperatura de referência,  $T_0$ .

## 4.2 Corpos de prova (CPs) aceitáveis

Na realização dos ensaios de tenacidade segundo a norma E1921, são aceitos os corpos de prova tipo compacto em tração, padrão  $[C(T)]$  e em formato de disco  $[DC(T)]$ , e os de flexão  $[SE(B)]$ , sendo que para os últimos permite-se a utilização de seções transversais nas quais  $W = 1B$  ou  $2B$ , permitindo assim a inclusão de corpos de prova de geometria Charpy com pré-trinca em fadiga ( $0,4T = 0,4$  polegadas de espessura). Esta é uma vantagem adicional de utilização desta nova norma, pois assim torna-se possível a execução de ensaios de Mecânica da Fratura em material originário de antigas instalações nucleares, irradiados em cápsulas de monitoração (*Surveillance*). Por ocasião da preparação dessas cápsulas, ainda não havia uma conscientização da importância da Mecânica da Fratura na extensão da vida útil de vasos de pressão nucleares. Hoje, na ausência da E1921, para a obtenção da tenacidade à fratura desses materiais irradiados, ter-se-iam que utilizar correlações empíricas entre ensaios de impacto e valores de tenacidade à fratura, o que aumentaria o conservadorismo e reduziria a eficiência de uma avaliação de extensão de vida útil dos componentes estruturais.

## 4.3 Definição da Temperatura de Ensaio

A E1921 apresenta diretrizes para a escolha de uma temperatura para a realização dos ensaios de tenacidade. Apesar de ser empírico, conforme mostrado a seguir, o procedimento para a definição dessa temperatura baseia-se na premissa de que os ensaios devem ser realizados a uma temperatura a mais próxima possível de  $T_0$ , a temperatura de referência na transição definida na E1921. Este procedimento não é de uso obrigatório, podendo-se realizar ensaios a qualquer temperatura em que se encontrem resultados válidos de tenacidade, conforme mostrado a seguir.

#### 4.4 Realização dos ensaios de fratura

Os ensaios de fratura devem ser realizados de acordo com o procedimento definido para a obtenção de valores de  $J$  descrito na norma ASTM E1820.

De acordo com as regras definidas da norma ASTM E1820, são realizados ensaios para a obtenção de uma curva de resistência em termos de  $J$ . Estes ensaios, segundo a E1921, devem ser repetidos até serem obtidos no mínimo 6 resultados válidos. Desde que pelo menos se tenha seis resultados válidos obtidos nos ensaios o valor de  $T_0$  calculado é representativo do material. É considerado válido o valor de tenacidade medido ( $K_{JC}$ ) que atenda a Eq. (5).

$$K_{JC} = \left( \frac{b_0 \sigma_{ys} E}{M} \right)^{0,5} \quad (5)$$

#### 4.5 Obtenção da temperatura de referência e da curva mestra

**Considerações iniciais.** Na norma em questão considera-se que os ajustes devem ser realizados em termos de valores de  $K$ , denominados  $K_{JC}$ , obtidos a partir dos valores de  $J_C$  computados. O motivo desta transformação é o de que as pesquisas desenvolvidas, no VTT (Finlândia) e no ORNL (USA), levaram à obtenção de valores limiares de tenacidade mínima e constantes da distribuição de Weibull utilizada nas análises que eram válidos somente se a tenacidade fosse expressa em termos de  $K$ . Subseqüentemente foi definido que a obtenção do equivalente em  $K$  do valor de  $J_C$  seria calculado considerando-se sempre uma condição de estado plano de tensões. Desta forma a seguinte relação deveria ser utilizada:

$$K_{JC} = \sqrt{J_C E} \quad (6)$$

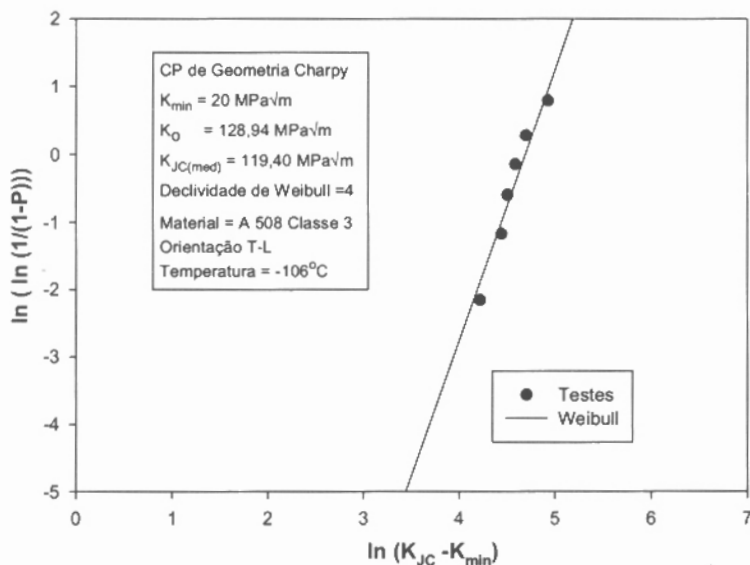
onde  $E$  = Módulo de Young

**Ajuste de Weibull para os valores de  $K_{JC}$  obtidos.** Para o tratamento estatístico dos valores de  $K_{JC}$  obtidos, devem estar disponíveis um número mínimo de 6 resultados válidos provenientes de ensaios e aplicada uma distribuição de Weibull de 3 parâmetros modificada, apresentada na Eq. (7), onde  $b$  = declividade = 4 e  $K_{\min} = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \left[ \frac{(K_{JC} - K_{\min})}{(K_0 - K_{\min})} \right]^b \right\} \quad (7)$$

Na distribuição de Weibull de 3 parâmetros modificada, conforme definida acima, a única incógnita é  $K_0$ , obtido pelo *Maximum Likelihood Method* através da Eq. (8), onde  $r$  é o número de resultados válidos e  $N$  é o número total de resultados de tenacidade obtidos dos ensaios. A Fig. 2 apresenta um ajuste de Weibull de 3 parâmetros aplicado a resultados de tenacidade na transição de um aço A508 Classe 3 brasileiro (DeAquino, 1997).

$$K_o = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (K_{JC,i} - K_{\min})^{1/4}}{(r-0,3068)} \right]^{1/4} + K_{\min} \quad (8)$$



**Figura 2 - Ajustes de Weibull para  $K_{JC}$ -A508 Classe 3 – Orientação T-L a  $-106^\circ\text{C}$  (DeAquino, 1997)**

**Cálculo de  $K_{JC}$  mediano.** Após o ajuste de Weibull, o próximo passo a ser seguido é o da obtenção do valor mediano da tenacidade à fratura  $K_{JC(\text{med})}$ , na temperatura de realização dos ensaios. Este valor será então usado tanto na obtenção de  $T_o$ , a temperatura de referência na região de transição, quanto para a construção da Curva Mestre, definindo a variação da tenacidade à fratura com a temperatura. A seguinte expressão deve ser utilizada:

$$K_{JC(\text{med})} = (K_o - 20)[\ln(2)]^{0,25} + 20 \quad (9)$$

**Cômputo da temperatura de referência na transição.** A temperatura de referência na região de transição dúctil frágil,  $T_o$ , é definida como a temperatura correspondendo a  $K_{JC(\text{med})} = 100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , em um corpo de prova de tamanho 1T. Esta temperatura pode ser computada numericamente a partir de  $K_{JC}$  mediano na temperatura de ensaio, a partir da Eq.10, onde T é a temperatura na qual  $K_{JC(\text{med})}$  foi obtida.

$$T_o = T - (0,019)^{-1} \ln \left[ \frac{K_{JC(\text{med})} - 30}{70} \right] \quad (^\circ\text{C}) \quad (10)$$



**Construção da Curva Mestra.** A Curva Mestra (*Master Curve*), representada pela Eq. (11) é a curva que define o comportamento do material (aço) na região de transição, definindo a variação de  $K_{Jc}$  mediano em função da temperatura relativa  $T-T_0$ .

$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)] \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (11)$$

A Curva Mestra deve ser construída em termos dos valores de tenacidade calculados para corpos de prova com espessura  $1T$  ( $B_{1T}$ ). Se os ensaios forem realizados em corpos de prova com espessura ( $B_x$ ) diferente, então os resultados obtidos ( $K_{Jc,x}$ ) terão que ser transformados para valores equivalentes associados a uma espessura unitária ( $K_{Jc,1T}$ ) utilizando-se a Eq. (12).

$$K_{Jc,1T} = 20 + [K_{Jc,x} - 20] \left( \frac{B_x}{B_{1T}} \right)^{1/4} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (12)$$

A Curva Mestra substitui com vantagem as curvas de projeto  $K_{Jc}$  and  $K_{IR}$  do ASME B&PV Code (ASME, 1998), visto que são obtidas para o material de interesse, enquanto as curvas do ASME representam um limite inferior de um universo de diferentes materiais. A norma ASTM E1921 fornece equações, semelhantes a Master Curve, associadas a 1, 2, 3, 4, e 5% (*lower bound*) e 95, 96, 97, 98 e 99% (*upper bound*) de probabilidade de fratura. Com estas eq. é possível definir uma faixa de valores que engloba o espalhamento típico da transição, com a confiabilidade desejada. Isto não é possível de ser determinado com as curvas de referência do código ASME.

### **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP, Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, por financiar parte desta pesquisa através do projeto 97/13023-4.

## REFERÊNCIAS

- ASME, 1998, Boiler and Pressure Vessel Code
- ASTM - American Society for Testing of Materials, 1995, Standard Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. (ASTM. E399); Standard Method for  $J_{IC}$ , a Measure of Fracture Toughness. (ASTM. E813); Standard Method for Determining J-R Curves. (ASTM. E1152); Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement. (ASTM. E1290). In: 1995 Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM - American Society for Testing of Materials, 1997, Standard Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness. (ASTM E1737); Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. (ASTM. E1820) In: 1997 Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM - American Society for Testing of Materials, 1998, Test Method for the Determination of Reference Temperature,  $T_o$ , for Ferritic Steels in the Transition Range. (E1921). In: 1998 ANNUAL Book of ASTM Standards.
- DeAquino, C.T., 1997, Uma Nova Abordagem ao Fenômeno da Variação da Tenacidade à Fratura na Transição Dúctil-Frágil de Aços para Vasos de Pressão Nucleares, Tese de Doutorado, IPEN, University of São Paulo, São Paulo..
- Landes, J.D. & Herrera, R., 1989, A Direct J-R Curve Analysis of Fracture Toughness Tests. Journal of Testing and Evaluation, v.16, n.5, pp. 427-449.
- Weibull, W., 1951 A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics., Sept. 1951, pp. 293-297.

---

### EXPERIMENTAL EVALUATION OF J INTEGRAL IN STRUCTURAL STEELS – NEW PROCEDURES AND METHODOLOGIES

*Abstract.* Project codes and testing procedures for the characterization of materials are indispensable tools for achieving a safe and highly reliable design. However, the form that these documents are structured usually causes confusion to users. The objective of this work is to present, under a didactic and critical focus, the new testing methodologies, developed by ASTM in the last 2 years, for obtaining fracture toughness in terms of the J integral, the E1737, E1820 and E1921 standards, addressing eventual difficulties in their application.

*Keywords:* Fracture Mechanics, Structural Integrity, Mechanical Properties, Structural Steels