

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DE AÇOS PARA  
VASOS DE PRESSÃO NUCLEARES  
UTILIZANDO AMOSTRAS DO TIPO CHARPY**

**Carlos T. DeAquino \*, Marcelo F. Liendo \*\* e Arnaldo H.P. Andrade \*\*\***

**\*Centro Tecnológico da Marinha  
São Paulo, Brasil  
Fax: (011) 814-4695  
e-mail: deaquino@usp.br**

**\*\* Comision Nacional de Energia Atômica  
Buenos Aires, Argentina  
e-mail: liendo@cnea.edu.ar**

**\*\*\* IPEN / CNEN - SP  
São Paulo, Brasil  
Fone: (011) 814-4695  
e-mail : arnie@usp.br**

### **RESUMO**

O trabalho apresenta os fundamentos e aplicações de um desenvolvimento recente para utilização de corpos-de-prova padrão Charpy (entalhe V), pré-trincados, em ensaios de Mecânica da Fratura para avaliação da tenacidade de aços para vasos de pressão nucleares, nos programas de vigilância ("surveillance") destes componentes. Dentre os efeitos discutidos, incluem-se a utilização de mais de um parâmetro para caracterizar a tenacidade do material e o efeito da geometria (restrição plástica) na medição da mesma.

### **INTRODUÇÃO**

No projeto atual de vasos de pressão nucleares, a Mecânica da Fratura tem desempenhado importante papel, devido ao fato de estruturas com defeitos e trincas terem a possibilidade de falhar quando submetidas à tensões muitas vezes bem menores que aquelas que dominam o comportamento de estruturas sem defeitos, como o limite de escoamento,  $\sigma_y$ , e o limite de resistência,  $\sigma_{1.0}$ .

Em se tratando de aços ferríticos, que são usualmente utilizados no projeto e construção de vasos de pressão nucleares, VPR, constata-se que seu comportamento muda com a variação de temperatura. Tal alteração de comportamento é denominado transição dútil-frágil, uma vez que, conforme pode ser visualizado na Fig. 1, a altas temperaturas este tipo de aço apresenta um comportamento dútil, enquanto que a baixas temperaturas, seu comportamento é frágil. A altas temperaturas, a

existência de trincas torna-se algo passível de convivência, uma vez que normalmente a falha da estrutura ou componente se dá por colapso plástico da seção transversal, ou por um rasgamento dútil, sempre a tensões superiores ao limite de escoamento.

Entretanto, no projeto do VPR, deve-se considerar a possibilidade do aço ter um comportamento misto dútil-frágil, uma vez que ao longo da vida útil do reator podem ocorrer acidentes como o LOCA (perda de líquido refrigerante), em que água ou outros materiais a temperaturas muito baixas são injetados no reator para seu resfriamento.

Uma outra situação que leva o comportamento do aço a se posicionar na região de transição dútil-frágil é o deslocamento da curva de transição devido ao envelhecimento térmico e à fragilização neutrônica, sendo este último fenômeno ocasionado pelas reações nucleares acontecendo no interior do reator, que alteram sua

estrutura cristalina e tornam o material mais frágil. Esses dois últimos fenômenos aqui relacionados são altamente limitantes da vida útil de uma usina nuclear.

De modo a acompanhar o comportamento dos materiais envolvidos na fabricação do VPR e garantir que ao longo de sua vida útil, a degradação das propriedades desses materiais não venham a comprometer a integridade do reator, um programa de vigilância ("Surveillance"), no qual as propriedades dos materiais na região de maior fluxo de neutrons ("beltline" ou cintura) são periodicamente verificadas, deve fazer parte do Plano de Integridade do VPR. Isto tem sido feito de modo sistemático já há algum tempo na indústria nuclear. No entanto, o enfoque até hoje aplicado consiste na utilização de correlações empíricas entre resultados de testes de impacto do tipo Charpy e valores de tenacidade à fratura dos materiais envolvidos. Percebe-se a necessidade da adoção de um enfoque mais moderno, no qual as incertezas e, por conseguinte, os coeficientes de segurança possam ser reduzidos sem comprometer a qualidade do projeto.

Das observações feitas acima, conclui-se que há a necessidade de se conhecer bem o comportamento de aços na região de transição dútil-frágil. No entanto, existe o problema que nesta região a tenacidade à fratura dos aços apresenta significativo espalhamento [1], bem como uma dependência de tamanho e geometria do componente/estrutura sendo analisada.

a proposta por Weibull [2], tem ajudado a melhorar a caracterização à fratura.

Entretanto, para que se possa fazer previsões do comportamento à fratura em componentes a partir de resultados obtidos em testes em espécimes de laboratório, é necessário que se resolva o problema da dependência geométrica. A abordagem que tem sido atualmente utilizada é a da metodologia de caracterização do campo de tensões na ponta da trinca através de 2 parâmetros, onde o primeiro é responsável pela caracterização primária da tenacidade e o segundo, pela caracterização da restrição ("constraint"). Os modelos atuais desenvolvidos usando 2 parâmetros incluem modelos K-T para comportamento elástico-linear [3] e J-Q, aplicáveis a comportamento elasto-plástico [4]. Os supracitados modelos têm sido largamente utilizados como forma de correlacionar diferentes geometrias, porém raramente para prever o comportamento dessas outras geometrias.

Este trabalho apresenta uma proposta de alteração na forma de obtenção de valores da tenacidade à fratura em um programa de "Surveillance", bem como introduz o modelo desenvolvido pelo grupo de pesquisa do Prof. Dr. John D. Landes, da Universidade do Tennessee em Knoxville, com contribuições destes autores, para prever o comportamento de um componente ou estrutura à fratura, sempre que a sua restrição possa ser caracterizada quantitativamente. Tal modelo é baseado em uma caracterização J-Q do campo de tensões na ponta da trinca, conforme proposto por O'Dowd e Shih [4], associada a uma hipótese de "elo-mais-fraco" para tratamento da dependência de tamanho e espalhamento de dados de tenacidade.

## ALTERAÇÕES PROPOSTAS NO PROGRAMA DE "SURVEILLANCE"

Atualmente na obtenção de resultados de tenacidade à fratura dos aços constituintes do VPR, ao longo de sua vida útil, seguindo o determinado na especificação de um programa padrão de "Surveillance", encontra-se a dificuldade de que a maior parte das usinas em operação não contém, no interior das cápsulas de material sendo irradiado para testes dentro do Vaso do reator, corpos de prova que atendam às especificações das normas ASTM em vigor que tratam da Mecânica da Fratura. É comum, no entanto, que tais reatores contenham espécimes tipo Charpy com entalhe em V nas cápsulas sendo irradiadas. Nestes casos, normalmente, vale-se de correlações empíricas entre resultados de energia Charpy obtidos em testes de impacto e valores de tenacidade à fratura a serem utilizados para verificação de integridade. Devido ao fato de tais relações decorrerem da experiência acumulada ao longo dos anos, acompanhada de incertezas inerentes ao processo, tais valores de tenacidade são corrigidos de elevados fatores de segurança, de modo a garantir que a utilização dos mesmos não possam gerar consequências drásticas.

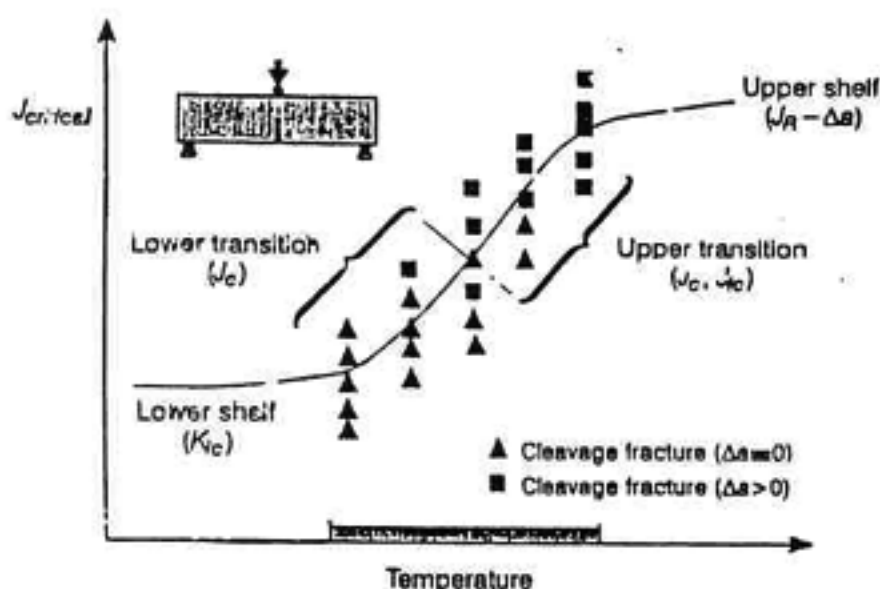


Figura 1. Curva de Transição Dútil-Frágil [8]

Resultados obtidos em testes executados em corpos-de-prova de determinada geometria não são consistentes, mesmo quando os espécimes pertencem à mesma corrida de aço ("heat"), apresentando muita variação quantitativa. Além disso, tais resultados não apresentam correlação com aqueles obtidos em ensaios realizados para a mesma corrida de aço em corpos-de-prova de diferentes tamanho e geometria.

Para o problema do espalhamento de dados da tenacidade à fratura para um determinado tipo de corpo-de-prova, bem como para o problema da dependência do tamanho do mesmo, a utilização de distribuições estatísticas baseadas na hipótese do "elo-mais-fraco", como

Em decorrência disso, a vida útil do vaso do reator é reduzida, quando poderia ser maior no caso da adoção de métodos menos conservadores para obtenção da tenacidade. Numa situação em que muitas usinas nucleares no mundo encontram-se com a metade de sua vida útil já ultrapassada, existe o estímulo do benefício de uma extensão de vida útil, motivo de bastante preocupação dos pesquisadores da área da Mecânica da Fratura.

Um outro aspecto a ser discutido é o de que os atuais "standards" da ASTM que tratam dos testes de Mecânica da Fratura [5], não são aplicáveis para a denominada região de transição, que deve ser considerada como passível de ocorrência durante a vida útil do reator, pelos motivos já descritos na INTRODUÇÃO. Atualmente, a única ferramenta disponível para se verificar o comportamento dos aços na região de transição é aquela apresentada na seção XI do Código ASME [6], onde são definidas curvas de referência para cálculo de comprimentos de trinca admissíveis. Estas curvas, apresentadas na Fig. 2, são baseadas em limites inferiores de resultados de testes realizados em diversos aços utilizados no projeto de vasos de pressão nucleares. Estas curvas foram obtidas a partir da plotagem de dados de  $K_{IC}$ ,  $K_{ID}$  and  $K_{IA}$  compilados de diversas corridas dos aços testados versus uma temperatura de referência denominada  $RT_{NDT}$ , obtida a partir de testes de impacto e de queda de peso, e têm suas equações apresentadas a seguir

$$K_{IC} = 36.5 + 3.084 \exp\{0.036(T - RT_{NDT} + 56)\} \quad (1)$$

$$K_{IR} = 29.5 + 1.344 \exp\{0.026(T - RT_{NDT} + 89)\} \quad (2)$$

onde as temperaturas estão  $^{\circ}\text{C}$  em e os valores de K em  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

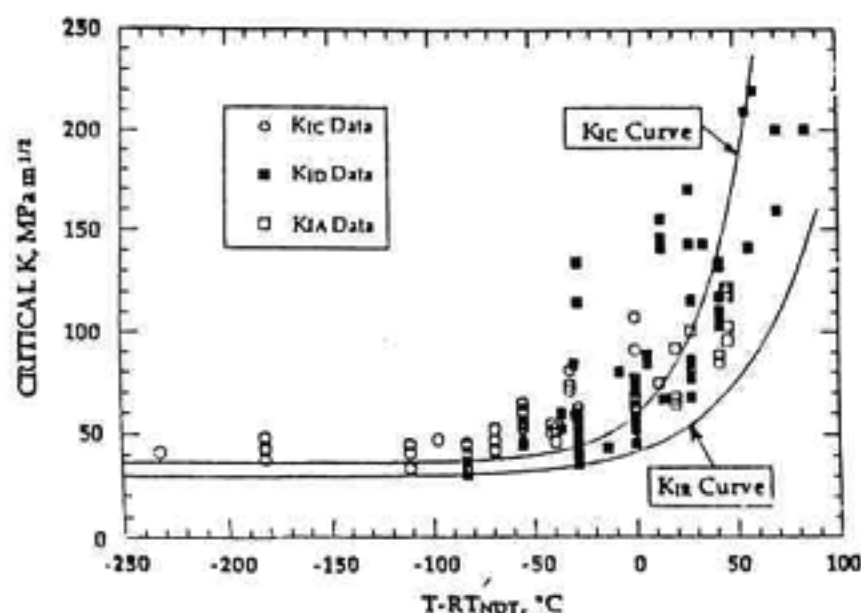


Figura 2. Curvas de Limite Inferior de Tenacidade [6]

A seguintes desvantagens são evidentes quando da adoção da abordagem definida no Código ASME:

- As curvas não são dependentes do material ou da corrida sendo utilizada na construção de um específico VPR, mas sim um limite inferior de um universo muito grande e heterogêneo de corridas de materiais

utilizados em projetos de vasos de pressão nucleares. Isto significa que, em sua grande maioria, os resultados obtidos a partir da utilização das curvas de referência são extremamente conservadores.

- A temperatura de referência  $RT_{NDT}$  é baseada em correlações empíricas entre a Mecânica da Fratura e testes de impacto tipo Charpy mais a NDTT, a temperatura de ductilidade nula, obtida a partir de testes de queda de peso. Devido a existência de incertezas nas correlações, elevados fatores de segurança são embutidos no processo.
- O espalhamento de dados decorrente da variabilidade dos materiais na região de transição não é considerada nesta abordagem.
- De modo a se obter as referidas curvas, um número enorme de testes precisou ser realizado, levando ao gasto de milhões de dólares no processo. Muitos materiais considerados já não são empregados hoje em projetos, o que significa que uma necessária atualização nas curvas levaria ao desperdício de outra grande quantidade de dinheiro.

Baseados na necessidade de uma abordagem mais moderna e econômica, e também menos conservadora, os autores propõem a adoção de uma nova filosofia de obtenção de valores de tenacidade à fratura, baseada em um novo "standard" sendo desenvolvido pela ASTM [7], aplicável também para a região de transição. Como vantagem adicional de utilização desta nova norma, pode ser citada a possibilidade de se executar testes de Mecânica da Fratura em corpos de prova de geometria Charpy, permitindo assim que aquelas usinas nucleares em operação que não disponham de corpos de prova de Mecânica da Fratura sendo irradiados em cápsulas de "Surveillance", também possam se beneficiar deste procedimento menos empírico, e, portanto, menos conservador, de obtenção da tenacidade à fratura dos materiais da região do "beltline".

Além disso, de forma a tornar a nova abordagem independente do tamanho e geometria do corpo de prova, deve-se incluir no processo de obtenção dos valores de tenacidade à fratura um tratamento da fratura por clivagem baseada no conceito de "elo mais fraco", seguindo o método apresentado pelo grupo de trabalho do Prof. Landes [8], da Universidade do Tennessee, do qual os autores participaram como colaboradores.

## RÁPIDA VISÃO GERAL DO NOVO "STANDARD"

Conforme mencionado, a ASTM, através de seu Comitê E08, que trata de Fadiga e Fratura, vem trabalhando na elaboração de uma nova norma que trata do comportamento à fratura de aços na região de transição dútil-frágil. Tal norma tem sua aprovação programada

ainda para o ano de 1996, devendo ser incluída no 1997 *ASTM Book of Standards*. Baseada na última versão provisória atualmente em votação, uma sinopse dos principais pontos deste documento é a seguir apresentada, de modo a auxiliar o entendimento da nova abordagem sendo sugerida por estes autores.

**Resumo dos Testes** O objetivo dos testes é o de determinar o valor de  $J$  de clivagem, sendo necessário seguir-se as seguintes etapas:

1. Preparo dos corpos-de-prova
2. Seleção das temperaturas de teste
3. Execução de testes de fratura segundo os procedimentos especificados na E1152
4. Obtenção da Curva  $P \times v$
5. Repetição dos testes para 6 espécimes

**Calculando  $J$  de Clivagem** A obtenção de  $J$  de clivagem é feita através da seguinte relação matemática:

$$J_c = J_{elastic} + J_{plastic} \quad (3)$$

**Cálculo da tenacidade na transição**

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c E} \quad (4)$$

onde  $E$  = Módulo de Young

**Ajuste de Weibull** Deve-se ajustar os resultados obtidos usando-se uma abordagem de Weibull, de 3 parâmetros, conforme a equação a seguir:

$$P_f = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(K_{Jc} - K_{min})}{(K_0 - K_{min})}\right]^b\right\} \quad (5)$$

$b$  = declividade = 4

$K_{min} = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

$K_0$  é determinado usando-se coordenadas de Weibull

**Cálculo de  $K_{Jc}$  mediano**

$$K_{Jc(\text{med})} = (K_0 - 20)[\ln(2)]^{0.25} + 20 \quad (6)$$

**Obtenção da temperatura de referência na transição  $T_0$**   
É a temperatura correspondente, na curva-mestra, a aproximadamente um valor de  $K_{Jc}$  mediano de  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , obtida em um corpo-de-prova de espessura de 1 polegada

$$T_0 = T - (0.019)^{-1} \ln\left[\frac{K_{Jc(\text{med})} - 30}{70}\right] \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (7)$$

onde  $T$  é a temperatura na qual  $K_{Jc(\text{med})}$  foi obtido.

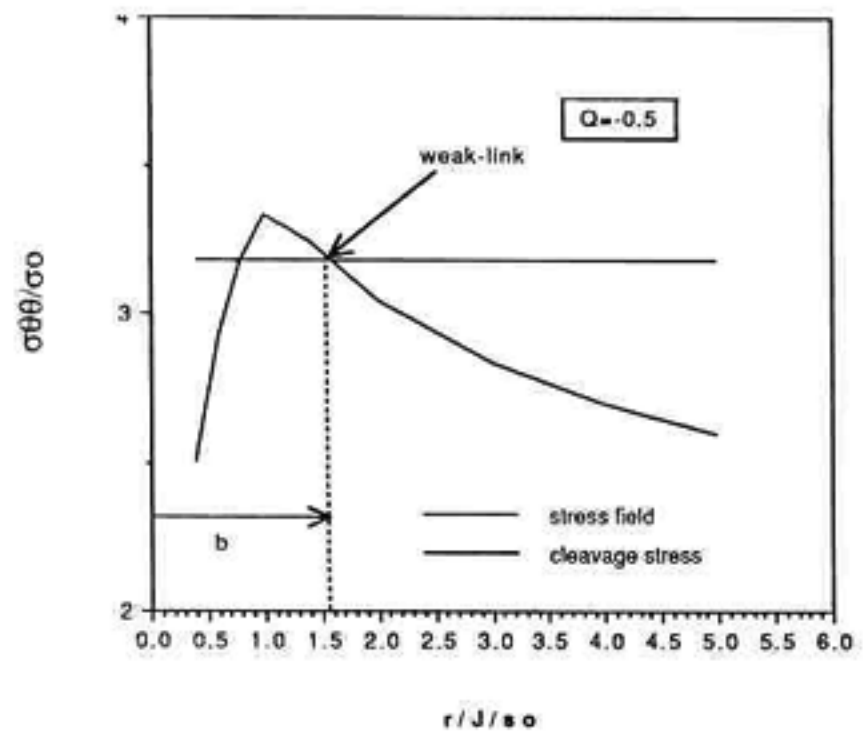
**Definição da Curva-Mestra** A chamada curva-mestra define o comportamento do material (aço) na região de transição:

$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)] \quad (8)$$

com as unidades em  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Esta abordagem substitue as curvas de limite inferior de  $K_{IC}$  and  $K_{IR}$  apresentadas no código ASME.

## MODELO DE LANDES

Este modelo permite a previsão da faixa de espalhamento da tenacidade à fratura para um componente/estrutura a partir do conhecimento da faixa de espalhamento medida em uma geometria de corpo-de-prova. Ele assume como hipótese inicial que a banda de espalhamento da distância do elo-mais-fraco à ponta da trinca, aqui denominada  $r_{wl}$ , é uma característica do material. A definição da posição do elo-mais fraco, que dará iniciação ao processo de fratura por clivagem está associado à interseção da curva representativa do campo de tensões na região da ponta da trinca com a reta definindo a tensão de clivagem, conforme mostrado na Fig. 3.



A utilização de uma abordagem utilizando a hipótese de elo-mais-fraco é baseada nos trabalhos de Heerens et al., [9], onde os autores observaram que a integral  $J$  não seria o parâmetro apropriado para fornecer uma caracterização de fratura à clivagem independente do tamanho e geometria do espécime em teste. Também naquele trabalho concluiu-se que a faixa de espalhamento dos valores de  $J$  de clivagem,  $J_c$ , é essencialmente controlado por  $r_{wl}$ . Além disso, constatou-se que diferentes tipos de corpos-de-prova, preparados com o mesmo material, apresentavam aproximadamente a mesma tensão de fratura por clivagem. Landes, na definição de seu modelo, partiu das conclusões do trabalho de Heerens para postular que  $r_{wl}$  é uma propriedade característica do

material e portanto o parâmetro ideal para caracterizar a fratura por clivagem.

O modelo desenvolvido por seu grupo aplica-se não somente à previsão do comportamento à fratura em uma geometria a partir de experimentos realizados em um espécime diferente, mas também para que se possa obter o comportamento de uma mesma geometria a diferentes temperaturas.

Para tanto faz-se necessário conhecer a banda de espalhamento de  $J$  de clivagem na situação inicial, bem como os valores do parâmetro  $Q$  para esta condição de geometria e temperatura. A partir daí obtém-se a banda de espalhamento de  $r_{w1}$ , que é uma característica do material. Seu conhecimento é o que nos permite obter o comportamento para outras geometrias e temperaturas.

Além da aplicação acima detalhada é também possível, usando-se o modelo, prever-se o fim da região de transição dútil-frágil, o que atualmente é simplesmente um valor arbitrado, quando se utiliza a ferramenta atual disponível para projeto, que é a curva de  $K_{Ic}$  e  $K_{Ic}$  do ASME B&PV Code.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão e admiração pessoal pelo Dr. John D. Landes, da University of Tennessee at Knoxville, e pelo Eng. Don E. McCabe, do Oak Ridge National Lab, pelos conhecimentos e experiência transmitidos quando de sua estadia no Tennessee, motivo de engrandecimento profissional destes autores.

#### REFERÊNCIAS.

- [1] Wallin, K. **Fracture Toughness Testing in the Ductile-to-Brittle Transition Region**, Advances of Fracture Research (ICF7), Pergamon Press, Oxford, pp.267-276, 1989
- [2] Weibull, W., **A Statistical Distribution Function of Wide Applicability**, Journal of Applied Mechanics, pp.293-297, Setembro de 1951
- [3] Hancock, J.W. et al., **Constraint and Toughness Parametrized by T**, Constraint Effects in Fracture, ASTM

1171, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 21-40, 1991

[4] O'Dowd, N.P. e Shih, C.F., **Two-parameter Fracture Mechanics: Theory and Applications**, preliminary version, June 1992

[5] ASTM Annual Book of Standards, ver **E399-Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials; E813-Standard Method Test for Jic; E1152-Standard Method for Determining J-R Curves**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991.

[6] ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section XI, **Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components**, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1992.

[7] ASTM, **Test Practice for Fracture Toughness in the Transition Region**, Draft # 10, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1995.

[8] DeAquino, C.T., Landes, J.D. e McCabe, D.E., **A Two-parameter Model to Predict Fracture in the Transition**, SMiRT 13, Porto Alegre, Brazil, 1995

[9] Heerens, J. et al., **Interpretation of Fracture Toughness in the Ductile-to-Brittle region by Fractographic Observations**, Defect Assessment in Components - Fundamentals and Applications,ESIS/EGF 9, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 659-678, 1991.

#### ABSTRACT

This paper presents a new approach to Fracture Mechanics toughness behavior to be used in Surveillance Programs of nuclear pressure vessels. A new method, using Charpy size specimens and a new ASTM standard for ductile-to-brittle transition region, together with the accounting for size and geometry effects is proposed by the authors, to reduce the uncertainties and conservatism present in the current approach, the ASME Code Lower-Bound Toughness Curves.