

AVALIAÇÃO DA FRATURA DINÂMICA NO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI-316 ATRAVÉS DO ENSAIO DE IMPACTO INSTRUMENTADO CHARPY ¹

Bruno Jardim França Rodrigues ²
Jefferson José Vilela ³

Resumo

O estudo da fratura dinâmica no aço inoxidável austenítico AISI-316 utilizando-se o ensaio de impacto Charpy instrumentado será apresentado neste artigo. Primeiramente foram obtidos os parâmetros básicos de mecânica da fratura dinâmica e, posteriormente, os resultados foram analisados comparando-se duas metodologias de cálculo de resistência à fratura dinâmica que são: o método da “compliance”, e o método da zona de estiramento. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura ambiente e $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, com uma energia de impacto de 300 J. Os corpos-de-prova tipo Charpy com entalhe em forma de V foram pré-trincados até 5 mm ($a_0/w = 0,5$). Foi feita análise fractográfica da superfície de fratura para a obtenção dos parâmetros necessários ao cálculo da zona de estiramento. Na análise pelo método da “compliance”, dois corpos-de-prova foram utilizados para cada temperatura, e um corpo-de-prova para cada temperatura foi analisado na obtenção de J_{Id} pelo método da zona de estiramento. Não foi assumido nenhum ângulo de embotamento na determinação de SZW e, os valores obtidos variaram de 22 a 27°. Os resultados, tanto para o método da “compliance” como para o método da zona de estiramento mostraram a necessidade de um melhor tratamento estatístico dos ensaios. Também, foi observado uma grande diferença entre os valores calculados pelos dois métodos, sendo que o método da “compliance” foi o mais conservativo. O aço inoxidável austenítico AISI-316 apresentou comportamento extremamente dúctil na faixa de temperatura estudada.

Palavras-chave: Ensaio Charpy; Zona de estiramento; Compliance; Fratura dinâmica.

1 - 60º Congresso ABM, Belo Horizonte, Julho de 2005.

2 - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Serviço de Integridade Estrutural.

3 - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Serviço de Integridade Estrutural.

INTRODUÇÃO

Com o envelhecimento do parque industrial brasileiro, prolongar a vida útil de equipamentos industriais torna-se uma opção econômica para aproveitar melhor o capital inicial investido e reduzir o impacto ambiental. Em muitas siderúrgicas, hidrelétricas e mineradoras existem equipamentos com mais de trinta anos de operação que necessitam de avaliações da integridade estrutural e programas de extensão de vida. As técnicas utilizadas neste tipo de avaliação são baseadas em mecanismos de fratura.

Até hoje, não existe ainda um método completamente adequado para caracterizar e medir a resistência à fratura dos materiais quando submetidos a cargas dinâmicas. As teorias e as técnicas experimentais para a obtenção dos parâmetros de fratura sob carregamento dinâmico ainda não estão bem definidas. Atualmente, determina-se esses parâmetros por meio do ensaio de impacto Charpy instrumentado utilizando corpos-de-prova pré-trincados, os quais são simples e baratos. A instrumentação é extremamente útil, na medida em que se torna possível a interpretação quantitativa dos resultados dos ensaios.

O ponto principal do trabalho foi o levantamento dos parâmetros característicos de fratura sob carregamento dinâmico do aço inoxidável austenítico AISI-316, utilizando-se uma máquina de ensaio de impacto Charpy instrumentado. Este ensaio permite analisar e prever mecanismos de fratura dinâmica (WALLE, 2003). Utilizando essa técnica, foi proposto um trabalho com os seguintes objetivos:

- Levantar os parâmetros de mecânica da fratura sob carregamento dinâmico do aço inoxidável austenítico AISI-316.
- Comparar dois métodos de cálculo de resistência à fratura dinâmica: “compliance” e zona de estiramento.

O termo “compliance” é mais bem compreendido como sendo a flexibilidade de um material quando esse está submetido a um carregamento qualquer, ou seja, é o valor do deslocamento sofrido pelo material por unidade de carga. Durante o ensaio sob carregamento dinâmico, a flexibilidade do material tende a aumentar bruscamente, e à medida que a trinca se propaga no material, a resistência à flexão reduz.

O grau de variação da “compliance” é definido da seguinte maneira:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C - C_{el}}{C_{el}} \quad (1)$$

onde C é a “compliance” na região linear da curva carga-deslocamento, e é definida como:

$$C = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (2)$$

onde Δf é a variação do deslocamento e ΔP é a variação da carga ao longo da curva. C_{el} é a razão entre o deslocamento e a carga no ponto de transição elasto-plástica:

$$C_{el} = \frac{f_y}{P_y} \quad (3)$$

onde P_y é a carga de escoamento e f_y é o deslocamento correspondente a essa carga.

Através da curva $\frac{\Delta C}{C} \times \text{deslocamento}$ pode-se obter o ponto onde se inicia a propagação da trinca que corresponde a uma variação brusca na curva. Calculando a energia absorvida até este ponto (E_i) pode-se conseguir o valor da resistência à fratura sob carregamento dinâmico do material (J_{Id}) de acordo com a equação:

$$J_{Id} = \frac{2.E_i}{B.(W - a_0)} \quad (4)$$

onde B é a espessura do corpo-de-prova, W é a largura e a_0 é o comprimento inicial da trinca.

Na condição de carga elasto-plástica, a formação da zona de estiramento (Figura 1) ocorre devido à concentração de tensão existente na ponta da trinca. Além disso, essa concentração de tensão provoca o escorregamento dos planos cristalinos e então ocorre deformação plástica. A resistência à fratura pode ser obtida medindo-se a largura crítica da zona de estiramento (SZW_c) na superfície de fratura do corpo-de-prova, que é posteriormente relacionada com J_{Id} . Essa relação é dada da seguinte forma (SREENIVASAN, 1996):

$$J_{Id} = \frac{\delta_{pl} \times E}{222,5} \quad (5)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material e δ_{pl} é o deslocamento correspondente ao início da propagação rápida da trinca, dado por:

$$\delta_{pl} = 2 \times \tan \theta \times SZW \quad (6)$$



Figura 1. Geometria do perfil da zona de estiramento.
 Fonte: SREENIVASAN, 1996.

MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi o aço inoxidável austenítico AISI-316 fornecido pela Aços Especiais Itabira (ACESITA), cuja composição química encontra-se na tabela abaixo:

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável austenítico AISI-316.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0,03	1,49	0,55	0,031	0,003	17,47	11,1	2,04
Al	Cu	Co	V	Nb	Ti	N (ppm)	
0,011	0,19	0,15	0,03	0,006	0,0021	417	

Seis corpos-de-prova do tipo Charpy foram usinados a partir de barras de aço inoxidável AISI-316 laminadas de tamanho 20x20x150mm. Esses corpos-de-prova seguem a norma ASTM E23. Os entalhes em forma de V foram feitos em uma brochadeira Blacks Equipment Limited. As amostras foram ensaiadas nas seguintes temperaturas: ambiente, 200°C e -196°C, sendo dois testes por temperatura. Os entalhes foram realizados na direção L-T segundo a norma ASTM E399. Todos os corpos-de-prova foram pré-trincados na máquina de ensaios servo-hidráulica INSTRON modelo 8802 com capacidade 250 kN. As pré-trincas foram de 5 mm.

Os ensaios de impacto seguiram a norma ASTM E23 e foram realizados no equipamento INSTRON WOLPERT PW30 de capacidade 300 J instrumentado e calibrado de acordo com a norma ASTM E1236. Além disso, os dados dos ensaios foram obtidos por meio de um amplificador G-100 de 2500 kHz e do programa IMPACT versão 2.75 da INSTRON.

Para o cálculo da resistência à fratura dinâmica utilizando o método da “compliance”, trabalhou-se com uma planilha Excel com a formulação mencionada na introdução. Posteriormente, foi usado o microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol, modelo JSM 5310, para caracterizar a superfície de fratura de 3 corpos-de-prova. Mediu-se a zona de estiramento em três posições distintas em cada corpo-de-prova, para ângulos α de 0°, 20°, 40° e 60°, totalizando 12 medições por corpo-de-prova. O ângulo θ foi determinado a partir de SZH e, com uma relação trigonométrica simples obteve-se o valor de SZW (SREENIVASAN, 1996).

A curva tensão-deformação do material foi obtida por meio de um ensaio de tração executado na máquina de ensaios universal Instron TTDML. Através dessa curva, o módulo de elasticidade foi medido e utilizado no cálculo de J_{Id} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas de Impacto

Seis curvas de impacto referentes às temperaturas de -196°C, T_{amb} e 200°C foram obtidas, sendo duas curvas para cada temperatura (Figura 2).

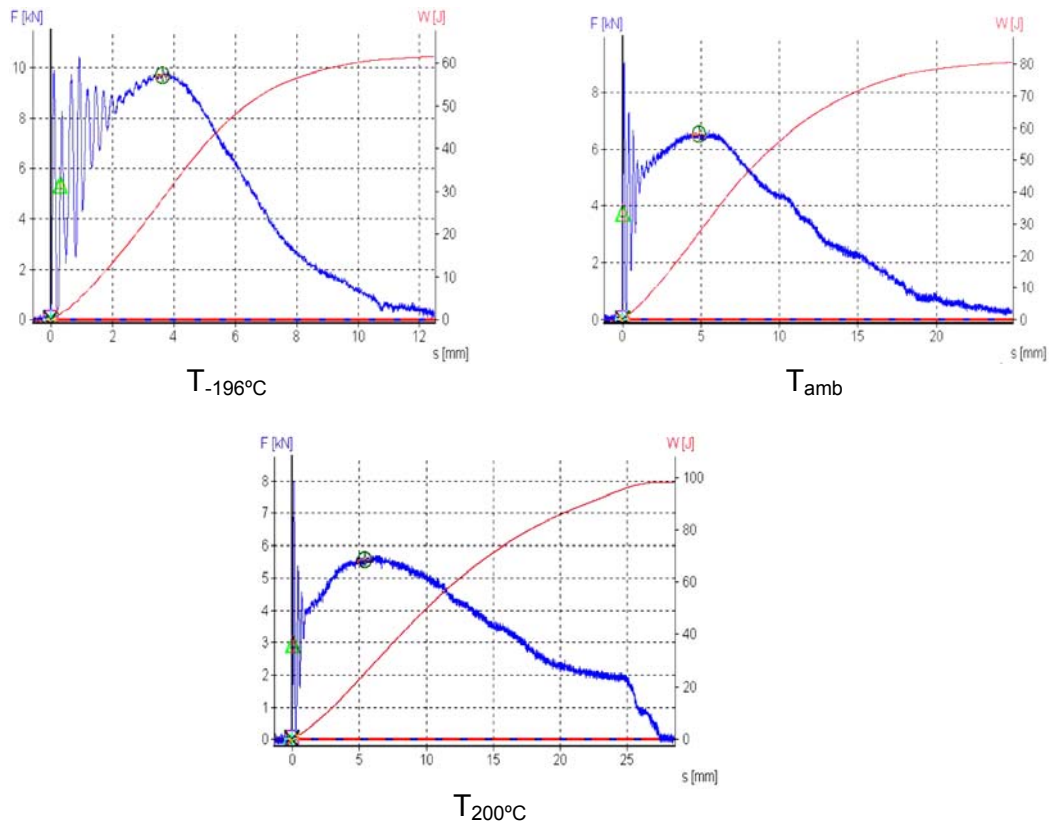


Figura 2. Curvas de impacto dos corpos-de-prova ensaiados em três temperaturas diferentes.

As curvas mostraram-se coerentes, pois a energia total absorvida pelo corpo-de-prova aumenta com a temperatura. Observa-se também que a variação da quantidade de energia absorvida com a temperatura foi pequena. O maior valor de carga máxima ocorre para o corpo-de-prova ensaiado a -196°C e o menor valor ocorre para o corpo-de-prova ensaiado a 200°C .

Observa-se claramente pelas curvas de energia que o aço inoxidável austenítico AISI-316 não apresenta transição dúctil-frágil, mesmo estando sob condição de baixa temperatura. Isso mostra que o material tem comportamento estritamente dúctil na faixa de temperatura estudada.

Estimativa de J_{Id} pelo método da “Compliance”

A aquisição eletrônica apresenta ruídos que dificultam a aplicação do método da “compliance”. Esse método leva em consideração a variação instantânea da carga, necessitando que as curvas sejam suaves. Para suavizar as curvas foi utilizada a técnica FFT (Fast Fourier Transform) (Figura 3). Por meio dessas curvas, o ponto onde se inicia a variação brusca da “compliance” foi determinado (Figura 4). A energia correspondente ao início de propagação foi medida (Figura 5) e, os valores de resistência à fratura dinâmica para diferentes condições de temperatura foram calculados (Tabela 2).

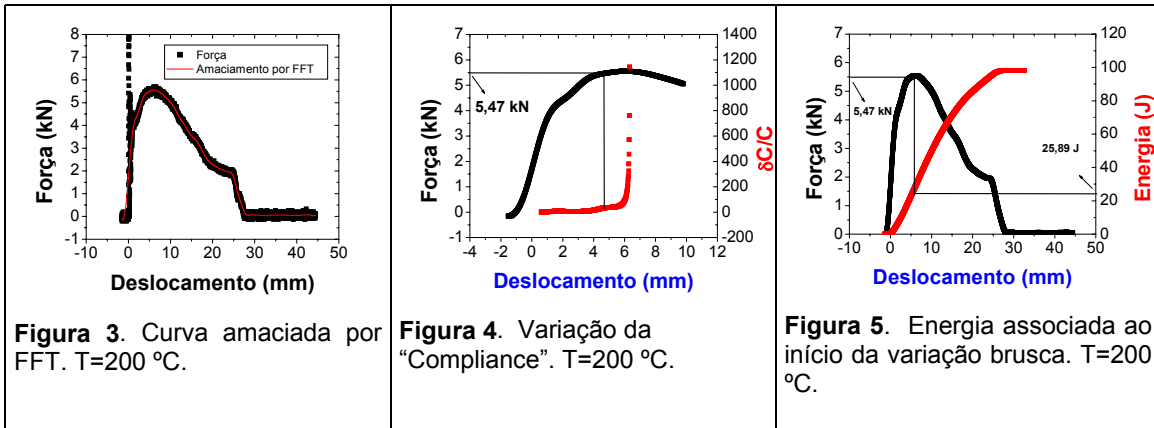


Tabela 2. Valores de J_{Id} calculados utilizando-se o método da “compliance”.

	$T_{-196^{\circ}\text{C}}$	T_{amb}	$T_{200^{\circ}\text{C}}$
J_{Id} (kJ/m ²)	788,29	547,43	797,43
	637,43	624,57	739,71
Média	712,86	586,00	768,57

Observa-se que o cálculo de J_{Id} através deste método tende a ser conservativo, pois o ponto onde a variação da “compliance” é brusca não corresponde à carga máxima do ensaio, indicando que a propagação rápida da trinca ocorre com valores de carga abaixo do carregamento máximo sofrido pelo corpo-de-prova.

O valor de J_{Id} calculado na temperatura ambiente foi menor que o valor calculado a -196°C . A maior diferença foi cerca de 40% em relação ao menor valor calculado e a menor foi de 2%. Isso não era esperado, já que materiais sujeitos a baixas temperaturas tendem a apresentar comportamentos mais frágeis. Um levantamento estatístico com uma quantidade maior de ensaios poderia levar a resultados mais precisos.

Estimativa de J_{Id} pelo método da Zona de Estiramento

A Figura 6 mostra em detalhe o aspecto da zona de estiramento.



Figura 6. Aspecto da Zona de Estiramento obtida por fractografia.

Utilizando-se a técnica proposta por Sreenivasan (1996), foram feitas as fractografias em 3 corpos-de-prova e mediu-se a projeção d para os ângulos de 0° ,

20°, 40° e 60°. Os resultados obtidos para o corpo-de-prova ensaiado a -196°C encontram-se na Figura 7.

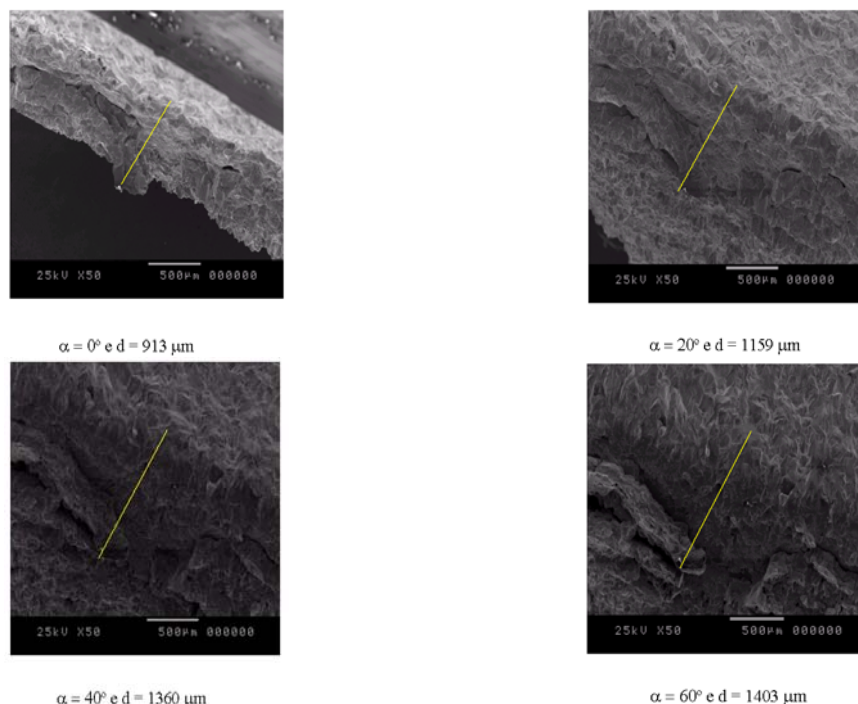


Figura 7. Medidas de d para vários ângulos de inclinação do corpo-de-prova ($T_{-196^{\circ}\text{C}}$).

Observou-se em todos os ensaios que a projeção d apresentou valores maiores com o aumento da temperatura de ensaio.

As medidas da zona de estiramento foram feitas em três posições ao longo da espessura do corpo-de-prova, permitindo a obtenção de valores médios tanto de SZW como do ângulo de embotamento θ .(Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios de SZW e θ obtidos para três temperaturas.

	$T_{-196^{\circ}\text{C}}$	T_{amb}	$T_{200^{\circ}\text{C}}$
SZW_{médio}(m)	$0,001699 \pm 6,8 \times 10^{-4}$	$0,001877 \pm 1,5 \times 10^{-4}$	$0,002777 \pm 1,5 \times 10^{-4}$
θ_{médio}(°)	$27,54 \pm 10,78$	$22,22 \pm 3,16$	$23,45 \pm 5,19$

Da mesma maneira que se fez a análise da projeção d, pode-se também analisar a largura da zona de estiramento, ou seja, o aumento da temperatura provoca uma maior resistência à propagação rápida da trinca gerando uma zona de estiramento com largura maior. O mesmo não pode ser afirmado para o ângulo de embotamento já que o seu valor é aproximado e, além disso, a zona de estiramento não é completamente uniforme, como foi observado nas superfícies de fratura dos corpos-de-prova.

Havel (1988) obteve valores de SZW para o aço inoxidável AISI-316 envelhecido que variaram de 0,11 a 0,56 mm. As medidas de Havel (1988) foram feitas diretamente das fractografias e, possivelmente, podem ter incluído a região da pré-trinca de fadiga.

É difícil reproduzir medidas confiáveis de uma zona de estiramento onde se tem tensões planas; de fato, nesses casos a zona de estiramento não se desenvolve completamente devido à intensidade das deformações plásticas e, assim, a altura da zona de estiramento não representaria o ponto real de abertura da trinca (GILMORE, 1983).

Com os valores médios de SZW e θ , foi possível determinar o valor da resistência à fratura dinâmica pelo método da zona de estiramento (Tabela 4).

Tabela 4. Valores de J_{Id} calculados pelo método da zona de estiramento com o equacionamento proposto por Sreenivasan (1996).

	T_{-196°	T_{amb}	T_{200°
J_{Id} (kJ/m ²)	1401,03	1213,29	1905,78

Observa-se claramente que o método da zona de estiramento é menos conservativo se comparado ao método da “compliance”. Nesse estudo obteve-se diferença de 157% acima do menor valor calculado pelo método da “compliance” para o corpo-de-prova ensaiado a 200°C.

Da mesma forma como ocorreu no cálculo da “compliance”, o método da zona de estiramento também subestimou a resistência à fratura dinâmica na temperatura ambiente, reforçando a idéia de um melhor tratamento estatístico utilizando um maior número de corpos-de-prova.

Valores de J_{Id} calculados na literatura para o AISI-316 envelhecido e ensaiado na temperatura ambiente (SREENIVASAN, 1996), variaram de 69 a 685 kJ/m², o que mostra que mesmo envelhecido o aço inoxidável AISI-316 pode apresentar uma boa resistência à fratura dinâmica.

O valor de J_{Id} para o AISI-321 obtido por ensaio de impacto foi 421 kJ/m² (LITTLE, 1985) e de 400 a 440 kJ/m² para o aço inoxidável AISI-304 (O'DONNELL, 1984). Esses resultados indicaram que provavelmente a influência do nível de tensão sob temperatura ambiente é pequena nesse tipo de material (SREENIVASAN, 1996).

Curvas J-R estáticas obtidas para o aço inoxidável AISI-316 (LIAW, 1986), indicam valores de resistência acima de 600 kJ/m². Na opinião do autor, como o aço inoxidável AISI-304 sofre maior deformação sob altos níveis de tensão, ele é mais sensível à variação de tensão que o aço inoxidável austenítico AISI-316.

CONCLUSÃO

- O aço inoxidável austenítico AISI-316 apresentou comportamento dúctil na faixa de temperatura de -196 °C a 200 °C, não apresentando transição dúctil-frágil após o levantamento dos parâmetros de mecânica da fratura dinâmica.
- O método da “compliance” é mais conservativo, já que esse não considera a carga máxima como sendo o ponto de início da propagação rápida da trinca. Além disso, o método é simples e barato, o que favorece propósitos de engenharia.

- O método estudado para a medida de SZW nas superfícies de fratura utilizando o microscópio eletrônico de varredura mostrou ser preciso, porém, menos conservativo. O método não supõe nenhum ângulo de embotamento. Valores de θ variaram de 22° a 27° contrariando o valor de 45° que normalmente é assumido.
- Para estimar J_{Id} com mais exatidão é necessário um melhor tratamento estatístico para a obtenção de valores de resistência à fratura dinâmica.

Agradecimentos

- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).
- Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken. *E1236*; Standard Practice for Qualifying Charpy Impact Machines as Reference Machines. West Conshohocken, March 1991. 6p.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken. *E23*; Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, agosto 2000. 26p.
- 3 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, West Conshohocken. *E399*; Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. West Conshohocken, 1997. 31p.
- 4 GILMORE, C. M., PROVENZANO, V., SMIDT JR., F. A. and HAWTHORNE, J. R. Influence of thickness and temperature on stretched zone size in J_{1c} tests. *Met. Sci.*, 17, 177-185, 1983.
- 5 HAVEL, R., NEALE, B. K. and SENIOR, B. A. The fracture properties of aged 316 stainless steel. *International Journal of Pressure Vessel Piping*, 37, 387 – 403, 1988.
- 6 LIAW, P. K. and LANDES, J. D. Influence of prestrain history on fracture toughness properties of steels. *Metall Trans.*, 17^A, 473 – 489, 1986.
- 7 LITTLE, E. A. Dynamic J-integral toughness and fractographic studies of fast reactor irradiated type 321 stainless steel. *Effects of Irradiation on Materials: Twelfth International Symposium, ASTM ATP 870*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1985.
- 8 O'DONNELL, I. J., EYRE, B. L. and NOBLE, F. W. Ductile fracture mechanisms in an austenitic stainless steel. *Advances in Fracture Research: Proc. of the Sixth International Conference on Fracture (ICF-6)*, vol. 3, pp. 1295-1302, New Delhi, India, December, 1984.
- 9 SREENIVASAN, P. R., RAY, S. K., VAIDYANATHAN, S. and RODRIGUEZ, P. Measurement of Stretch Zone Height and Its Relationship to Crack Tip Opening Displacement and Initiation J-Value in an AISI 316 Stainless Steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* Vol. 19, Nº 7, pp. 855-868, January, 1996.
- 10 WALLE, E. *Integridade Estrutural do Vaso de Pressão do Reator Nuclear*. Notas de aula, Curso de Pós-Graduação do CDTN/CNEN, Junho, 2003.

EVALUATION OF DYNAMIC FRACTURE IN THE AUSTENITIC STAINLESS STEEL AISI 316 BY USING INSTRUMENTED CHARPY IMPACT TEST

*Bruno Jardim França Rodrigues*²
*Jefferson José Vilela*³

Abstract

This study presents the dynamic fracture mechanics behaviour of the AISI-316 stainless steel using instrumented Charpy impact testing. The dynamic fracture toughness (J_{Id}) could be evaluated by two different methods: Compliance Changing Rate and Stretch Zone Measurement. The tests were made under $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, room temperature and $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, with 300 J of total impact energy. The standard Charpy specimens were pre-cracked with 5 mm. Stretch zone size was measured and analyzed by observing the fracture surfaces in an scanning electron microscope, and one specimen at each temperature was tested to evaluate it. Two specimens were tested to obtain J_{Id} by the compliance changing rate method. No blunting angle (θ) was assumed for the measurement of stretch zone width and in the present investigation θ was in the range of 22 to 27°. Also, the dynamic fracture toughness calculated by both methods showed a large difference, indicating the necessity of a better statistical approach. It was observed that the compliance changing rate gave conservative predictions of initiation toughness. Furthermore, the AISI-316 stainless steel showed an extremely ductile behaviour between -196°C and 200°C .

Key-words: Charpy testing; Stretch zone; Compliance changing rate; Dynamic fracture.

1 - 60º Congresso ABM, Belo Horizonte, Julho de 2005.

2 - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Serviço de Integridade Estrutural.

3 - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Serviço de Integridade Estrutural.