

INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES MICROESTRUTURAIS NA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA APARENTE DE AÇOS ESTRUTURAIS

Alessandro Roger Rodrigues

Ruís Camargo Tokimatsu

Adyles Arato Jr

Daniel Yvan Martin Delforge

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica, 15.385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil, E-mail: roger@dem.feis.unesp.br

Resumo

Neste trabalho discute-se a influência das variações microestruturais na tenacidade à fratura dinâmica aparente de aços estruturais utilizados como recebidos. Baseado em princípios de extensometria, instrumentou-se o martelo de uma máquina *Charpy* convencional e efetuou-se o ensaio considerando três tipos de materiais: aços ferríticos ABNT 1020, 1040 e 300M de qualidade aeronáutica. Foi possível verificar que a variação da microestrutura, através da escolha dos diferentes materiais, influenciou nos resultados do ensaio. O aço 1020 por apresentar plasticidade bem maior que os aços 300M e 1040, respectivamente, propiciou maior tempo de interação com o martelo pendular instrumentado. Esse fato pode ser evidenciado pelas diferentes amplitudes dos sinais obtidos ou através dos fatores de intensidade de tensões calculados, mesmo estando subestimados devido à possível limitação da arquitetura de medidas, quando comparados ao ensaio monotônico considerado como referência.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura dinâmica, Microestrutura, Sinais dinâmicos.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios de impacto, são assim denominados por serem ensaios dinâmicos, onde altas taxas de deformação estão envolvidas. A resposta a esse tipo de solicitação é expressa através de uma função transiente no tempo. Os ensaios *Charpy* e *Izod* são refinamentos de ensaios que foram desenvolvidos no início do século XX (*ASM - Metals Handbook*, 1975). Nesses ensaios, corpos de prova entalhados são ensaiados a uma temperatura conhecida em uma máquina pendular. Os resultados são apresentados em termos da energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto em função da temperatura.

Apesar de muitos ensaios diferentes terem sido desenvolvidos para o estudo de fraturas, avaliações posteriores comprovam a eficácia do ensaio *Charpy*. Constata-se que o ensaio é confiável, reproduzível e os resultados são poucos dispersivos. Porém, quando a preparação dos corpos de prova é apenas regular, mesmo que o ensaio seja rigorosamente controlado, ocorre uma grande dispersão dos resultados. Essa dispersão, que é intrínseca ao modo de início da fratura para os aços ferríticos, se deve também a variações locais nas propriedades dos aços - material mal elaborado - enquanto que outras ocorrem devido a dificuldades em se preparar entalhes perfeitamente reproduzíveis. Tanto a forma, a profundidade do entalhe, quanto o posicionamento adequado do corpo de prova na máquina de impacto são variáveis críticas.

Como ocorre em vários ensaios, o ensaio em pautas apresenta algumas limitações. A principal medida é a energia absorvida para fraturar o corpo de prova numa dada temperatura. Entretanto, é importante compreender que a energia absorvida no ensaio *Charpy* é apenas um parâmetro qualitativo, sem utilização direta nos cálculos de projetos em engenharia. Neste ensaio não há medidas em termos do nível de tensão, o que dificulta correlacionar a energia absorvida com o desempenho em serviço.

Segundo (Dieter, 1981), pode-se distinguir três categorias distintas de materiais metálicos quando focados através da tenacidade, tal como a medida no ensaio *Charpy* convencional. Os materiais da Categoria I apresentam uma faixa de temperatura de transição dúctil-frágil definida e pronunciada, em que se distingue perfeitamente os patamares de energia absorvida e se confere sua dependência com a variável temperatura. Os aços ferríticos ou de estrutura ccc de baixa e média resistência mecânica, assim como Berílio, Zinco e os utilizados neste trabalho pertencem à essa categoria. Os materiais da Categoria II de alta tenacidade independem da temperatura e, portanto, não apresentam a faixa de temperatura de transição. Os aços austeníticos ou de estrutura cfc de baixa e média resistência mecânica e a maioria dos que possuem estrutura hexagonal compacta se enquadram nessa classificação. Os materiais de elevada resistência mecânica, como ligas a base de titânio e alumínio pertencem à Categoria III. Eles não apresentam a faixa de temperatura de transição e possuem tenacidade tão baixa que a fratura frágil pode ocorrer para tensões nominais ainda no regime elástico a todas as temperaturas e taxas de deformação, quando existem trincas presentes em sua estrutura.

A filosofia do projeto, baseada no ensaio *Charpy*, se restringe em selecionar um material que possua suficiente tenacidade quando sujeito a condições severas de serviço, de modo que a capacidade do componente estrutural em suportar o carregamento possa ser calculada pelos critérios convencionais da resistência dos materiais, sem considerar, de forma quantitativa, as propriedades de fratura do material ou os efeitos de concentração de tensões provocadas pelas trincas. Assim, a estratégia de projeto para controle da fratura, segundo essa filosofia, visa simplesmente que o componente operará no patamar superior, isto é, acima da temperatura de transição. O objetivo é evitar a fratura de caráter frágil. No entanto, esse procedimento não impede a ocorrência da fratura, pois mesmo no patamar superior da curva de transição a tenacidade dos materiais é finita.

1.1 Tenacidade à Fratura

O projeto quantitativo, baseado na tenacidade, só tornou-se possível com o advento da mecânica da fratura. A mecânica da fratura linear elástica (MFLE), que é uma das ramificações da mecânica da fratura, exprime uma nova metodologia de projeto que contorna o dilema da tensão infinita da ponta da trinca, quando se aplica a teoria clássica da resistência dos materiais, através do cálculo do fator de concentração de tensões K_c quando o raio da ponta da trinca tende à zero. Na essência, trata-se de uma ferramenta de análise quantitativa que permite prever o comportamento de uma estrutura trincada sob o efeito de tensões.

A propriedade intrínseca dos materiais, que expressa a resistência à propagação de trinca, é denominada tenacidade à fratura. Este é o parâmetro fundamental para definir a condição de fratura, em senso macroscópico. Cabe ressaltar, entretanto, que existem diferentes metodologias para se determinar a tenacidade à fratura, sendo mecânica da fratura linear elástica (MFLE), mecânica da fratura elastoplástica (MFEP) e mecânica da fratura dinâmica, entre outros (Meyers & Chawla, 1982).

Ainda que a utilização da mecânica da fratura não esteja tão difundida, a tendência é que ela seja cada vez mais empregada no futuro. Nenhum componente estrutural está isento de uma condição trincada, que pode surgir pela ação de um meio agressivo, potencializado pela temperatura ou composição química. Assim, a maioria dos componentes estruturais são

passíveis de serem tratados por essa metodologia, sobretudo devido aos novos ditames sociais, em que apontam para a necessidade do uso racional de energia e materiais, associado à uma alta confiabilidade estrutural.

1.2. O Ensaio de Impacto *Charpy* Instrumentado

Desde a década de 60, muitos pesquisadores vêm estudando métodos para determinar um parâmetro denominado tenacidade à fratura dinâmica a partir de ensaios de impacto (Ireland, 1974). Nestes casos, normalmente, obtém-se curvas do tipo força *versus* tempo a partir de ensaios dinâmicos instrumentados, tal como *Charpy*, queda de peso e tração dinâmica, entre outros (Sanz, 1970). Entre estes, uma modificação do Ensaio *Charpy* clássico vem recebendo grandes atenções e surgiu como uma alternativa promissora, mesmo apresentando inúmeras complicações relacionadas à instrumentação.

Uma das várias formas de instrumentação consiste em transformar o martelo do pêndulo *Charpy* em uma célula de carga por intermédio de extensômetros. Isso possibilita obter mais informações acerca do ensaio. Essencialmente, o ensaio consiste em registrar o sinal do martelo pendular em um osciloscópio digital com memória na forma de força *versus* tempo. A Figura 1 mostra uma curva teórica típica de força *versus* tempo obtida a partir do ensaio de impacto *Charpy* Instrumentado. Esse tipo de curva, que se relaciona à curva carga-deflexão, obtida do ensaio de flexão em três pontos com aplicação monotônica da carga, pode fornecer informações sobre a carga de escoamento generalizado e carga máxima entre outras. A partir do registro carga-deflexão é possível determinar a porção elástica da curva tensão-deformação, o início da propagação da trinca e a energia para ocorrer essa propagação. A energia total gasta no impacto também pode ser obtida pela integração da curva, que se corresponde com os valores da energia no ensaio *Charpy* convencional.

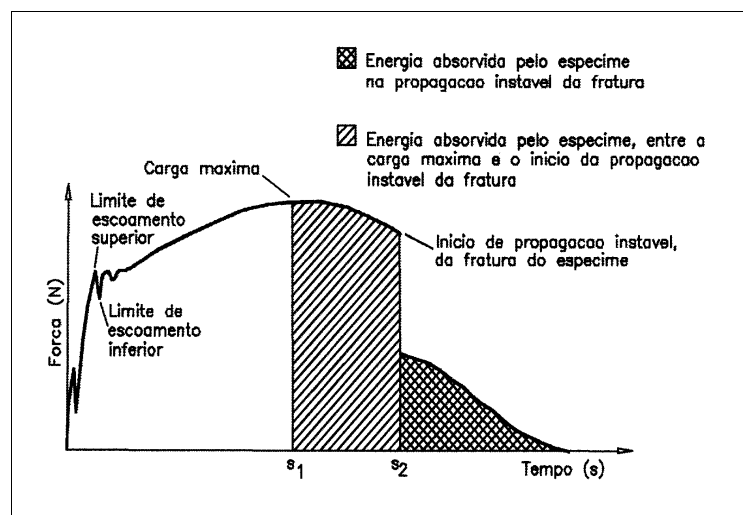


Figura 1. Curva teórica típica obtida a partir do ensaio *Charpy* Instrumentado.

Assumindo que a velocidade do pêndulo permanece constante no decorrer do ensaio, é possível calcular a energia absorvida pelo corpo de prova até a fratura completa através da seguinte equação (Hertzberg, 1989):

$$E_t = V_0 \int_0^t P dt \quad (1)$$

onde E_t é energia total [J], V_0 é a velocidade inicial do pêndulo [m/s], P é a força [N] e t é o tempo [s].

Na realidade, a velocidade do pêndulo decai durante o ensaio. A Equação 1 para ser utilizada precisa ser corrigida para compensar a redução de velocidade do pêndulo. Segundo (Augland, 1962), a energia absorvida real, para causar a fratura completa do corpo de prova, pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$E_{tc} = E_t(1 - \alpha) \quad (2)$$

onde $\alpha = E_t/4 E_0$ e E_0 é a energia potencial inicial do pêndulo [J].

O ensaio *Charpy* convencional mede a energia total absorvida pelo corpo de prova, que corresponde à soma da energia gasta para iniciar a fratura acrescida da energia gasta na propagação da trinca de fratura. No entanto, no caso do ensaio de impacto *Charpy* clássico, a energia total é lida diretamente na máquina de ensaio, como sendo um valor global, sem que se consiga obter separadamente os valores de energia para iniciar e propagar a trinca. Em decorrência da instrumentação do pêndulo de impacto *Charpy*, é possível conseguir dissociar esses valores de energia de fratura em duas componentes distintas (Hertzberg, 1989).

Assim, utilizando corpos de prova entalhados, e considerando o valor da carga necessária para que ocorra o início da propagação da trinca, é possível determinar o valor de um parâmetro de tenacidade à fratura sob carregamento dinâmico. Corpos de prova providos apenas de entalhe, sem a presença de pré trinca de fadiga, fornecem o parâmetro denominado tenacidade à fratura dinâmica aparente. Por intermédio dos procedimentos estabelecidos pela mecânica da fratura linear elástica, norma ASTM E-399/90, pode-se obter o valor intermediário do parâmetro de tenacidade à fratura K_Q , que corresponde a um valor condicional para o fator de intensidade de tensões crítico K_{IC} se algumas condições geométricas dos corpos de prova e critérios de ductilidade do material forem satisfeitas.

1.3. Sinais Dinâmicos e Sistemas de Medida

Dentre diversas classificações possíveis, os sinais podem ser caracterizados como estáticos e dinâmicos. Os sinais estáticos não variam com o tempo. Os sinais dinâmicos dependem do tempo e podem ainda ser classificados em sinais determinísticos, isto é, aqueles que variam periodicamente com o tempo, e sinais não determinísticos, aqueles que não possuem um padrão de repetição com o tempo (Figliola & Beasley, 1991).

No caso do ensaio *Charpy* Instrumentado, o sinal procurado é do tipo impulsivo, caracterizado por conter espectro de frequências de banda larga. Apenas condicionadores de sinais de alta frequência são capazes de fornecer respostas suficientemente rápidas sem degenerar o sinal. Segundo (Ireland, 1977), o sinal obtido pela célula de carga no ensaio é uma combinação bastante complexa das seguintes componentes: a) verdadeira resposta do corpo de prova frente à solicitação submetida no impacto; b) forças inerciais provenientes da aceleração do corpo de prova; c) flutuações de baixa frequência provenientes das ondas de tensões refletidas e d) ruídos de alta frequência causados pelo sistema eletrônico de amplificação.

Um fator chave no comportamento do sistema global de medidas relaciona-se ao sistema de aquisição do sinal a ser captado. Cada sistema de medidas responde distintamente para vários tipos de sinais de entrada. Para adquirir a informação precisa e correta acerca do sinal de entrada, é necessário conhecer o tempo de resposta do sistema utilizado. Isso é possível, modelando-se matematicamente o sistema de aquisição, que pode ser representado por uma equação diferencial ordinária linear de ordem n . O modelo geral de um sistema de medidas é apresentado na Figura 2.

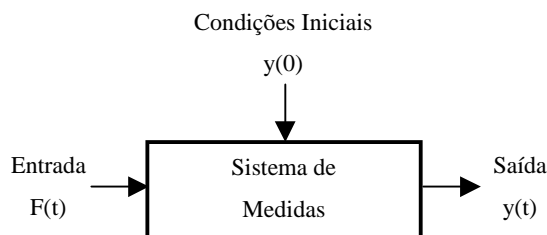


Figura 2. Modelo matemático geral de um sistema de medidas.

A maioria dos sistemas de medidas pode ser modelada por uma equação diferencial ordinária linear de ordem 1, como a apresentada na Equação 3.

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{1}{a_0} F(t) \quad (3)$$

onde $\tau = a_1/a_0$ fornece uma medida da velocidade de resposta do sistema e $K = 1/a_0$ é o ganho permanente do sistema. A constante de tempo τ é definida como o tempo requerido para o sistema de 1ª ordem atingir 63,2% da função degrau e representa uma especificação de suma importância na aquisição dinâmica de sinais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para avaliar a influência da microestrutura na tenacidade à fratura dinâmica aparente, foram escolhidos previamente três tipos de materiais metálicos distintos: aços ferríticos ABNT 1020, 1040 e 300M. Essa adoção foi fundamentada no fato de os materiais apresentarem propriedades mecânicas distintas, dentre as quais cita-se a ductilidade, o limite de resistência e a própria tenacidade. Com o propósito de se obter informações suficientes para contribuir junto à interpretação dos resultados finais, efetuou-se os ensaios apresentados abaixo seguindo-se as normas apropriadas para as medidas de dureza e ensaios de tração, Charpy e flexão monotônico em três pontos. Assim, a Tabela 1 apresenta essa caracterização considerando uma amostragem de 4 corpos de prova para cada tipo de material.

Tabela 1. Caracterização mecânica dos materiais utilizados.

Material	Dureza Vickers [HV]	Limite de Resistência [MPa]	Ductilidade [%]	Energia Absorvida [J]	Força Máxima [kN]*
Aço 1020	132 (1,6)	382 (11,2)	76 (0,8)	228 (6,5)	10,2
Aço 1040	275 (5,2)	589 (3,4)	52 (1,4)	18 (3,9)	16,7
Aço 300M	227 (2,9)	694 (41,2)	60 (2,2)	25 (6,0)	14,6

() Desvio Padrão

* Ensaio de flexão em três pontos com aplicação monotônica da carga em corpos de prova Charpy-V

A força máxima, obtida a partir do ensaio de flexão em três pontos, realizado na prensa mecânica Pavitest, modelo C1006, munida de um anel dinamométrico para aplicação do carregamento conhecido, representa a força de ruptura total para os aços de maior resistência mecânica 1040 e 300M e a força para causar o escoamento generalizado para o aço 1020.

2.2 Métodos

Para a leitura do sinal emitido pelo condicionador, utilizou-se um osciloscópio digital de memória com interface serial e frequência de leitura de 60MHz, bem como um microcomputador para aquisição e tratamento dos resultados. A metodologia empregada na captação do sinal fundamentou-se na instrumentação do martelo pendular utilizando extensômetros metálicos elétricos. A definição do local de colagem dos extensômetros foi feita observando-se as recomendações e os procedimentos adotados em trabalhos similares e atuais (Delforge, 1994) e (Quinan, 1996). Dois aspectos foram decisivos para a escolha do local de colagem: segurança contra qualquer dano durante os impactos e alta sensibilidade na leitura do sinal.

Para tanto, houve a necessidade de se confeccionar um outro martelo pendular e alterar sua configuração geométrica. Um furo foi usinado próximo à região do impacto, onde quatro extensômetros foram devidamente colados na superfície interna, formando uma ponte de *weatstone* completa e simulando o princípio físico de um anel dinamométrico. A Figura 3 apresenta de forma esquemática o sistema de aquisição elaborado.

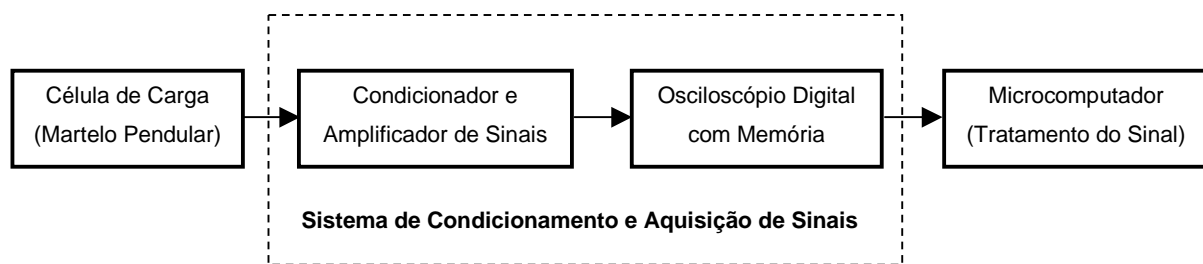


Figura 3. Sistema de medição esquemático empregado no ensaio *Charpy* Instrumentado.

3. RESULTADOS

Utilizando os procedimentos metodológicos estipulados para a realização do ensaio, obteve-se o conjunto de curvas mostrado na Figura 4 abaixo.

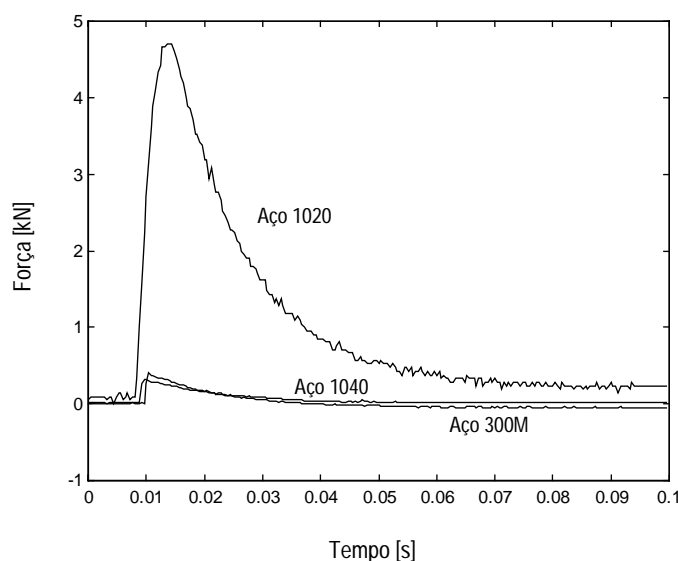


Figura 4. Gráfico força x tempo. Curvas obtidas através do ensaio de impacto *Charpy* Instrumentado considerando a velocidade de impacto padrão de 5,50 m/s.

Os resultados do fator de intensidade de tensões, apresentados abaixo na Tabela 2 juntamente com os valores medidos na condição monotônica para todos os materiais ensaiados, foram determinados a partir das forças máximas medidas durante ensaio *Charpy* Instrumentado e o ensaio de flexão monotônica, respectivamente.

De modo análogo ao ensaio de flexão em três pontos, os corpos de prova de aço 1040 e 300M apresentaram fratura completa e plana. Por outro lado, os corpos de prova constituídos de aço 1020 mostraram comportamento mais dúctil, fato esse evidenciado pelo tipo de fratura não plana e escoamento generalizado, sem a ocorrência de fratura completa em todas os corpos de prova ensaiados.

Tabela 2. Valores da tenacidade à fratura obtidos do ensaio *Charpy* Instrumentado e do ensaio de flexão em três pontos com aplicação monotônica do carregamento.

Material Ensaiado	Ensaio Charpy Instrumentado		Ensaio de Flexão	
	Força Máxima [kN]	K_{IDa} *[MPa.m ^{1/2}]	Força Máxima [kN]	K_{Ia} **[MPa.m ^{1/2}]
Aço 1020	4,71	21,9	10,2	47,7
Aço 1040	0,38	1,8	16,7	78,1
Aço 300M	0,46	2,2	14,6	68,2

* Fator de intensidade de tensões aparente obtido sob carregamento dinâmico (modo I - abertura)

** Fator de intensidade de tensões aparente obtido sob carregamento monotônico (modo I - abertura)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A variação microestrutural, conforme esperado, influenciou nos resultados da tenacidade à fratura dinâmica aparente obtidos através do ensaio *Charpy* Instrumentado, fato esse evidenciado pelas diferentes amplitudes dos sinais apresentados na Figura 4. A curva obtida pelo aço 1020 apresentou maior amplitude, em virtude da maior plasticidade perante os demais materiais ensaiados. Os aços 1040 e 300M, caracteristicamente mais frágeis que o aço 1020 para as mesmas condições de ensaio, apresentaram amplitudes do sinal transiente da força de impacto significativamente menores.

Assim, uma relação entre o mecanismo de aquisição dos sinais e o comportamento mecânico dos materiais pode ser melhor avaliada. Quanto maior a tenacidade ou, equivalentemente, quanto maior a plasticidade dos materiais ensaiados, maior é o tempo de interação entre o corpo de prova e o martelo pendular instrumentado, aproximando o tempo de ocorrência do fenômeno de fratura, mesmo de forma insuficiente, ao tempo de resposta do condicionador de sinais. Essa pequena compatibilização ou aproximação dos tempos favorece a aquisição do sinal, mesmo ainda incorporando atenuações na magnitude das curvas obtidas.

Com respeito ao comportamento mecânico dos materiais, é sabido que quando um dado carregamento é aplicado no corpo de prova, a plasticidade começa a agir, na região à frente da trinca, no sentido de tentar dificultar sua propagação. Quanto maior a ductilidade do material, maior é sua capacidade de absorver energia e tanto maior é o efeito do escoamento plástico sobre o mecanismo de propagação da trinca. Dessa forma, a maior ductilidade do aço 1020 proporcionou um maior tempo de interação entre o elemento sensor e o próprio corpo de prova, causando menor degeneração do sinal medido.

Comparando-se as forças máximas obtidas no ensaio *Charpy* Instrumentado com aquelas medidas na condição monotônica, determinada através do ensaio de flexão em três pontos, observa-se que as primeiras são menores que as obtidas monotonicamente, o que comprova a tendência dos valores em posicionar-se abaixo daqueles extraídos do ensaio de flexão, pois no ensaio *Charpy* o impacto ocorre à velocidade de 5,48 m/s, imprimindo uma taxa de deformação maior e promovendo a diminuição da resistência oferecida pelo corpo de prova ao

impacto, ou seja, quanto maior a taxa de carregamento, menor a plasticidade e menor é a tenacidade do material.

Mesmo sabendo que as forças máximas medidas no ensaio *Charpy* Instrumentado são muito menores que aquelas obtidas monotonicamente, principalmente para os aços 1040 e 300M, através de uma comparação dos resultados, verifica-se que uma certa proporção é resguardada entre as energias absorvidas pelos corpos de prova obtidas do ensaio *Charpy* clássico e os próprios valores de K_{IDa} , apresentados respectivamente nas Tabelas 1 e 2. Sob a ótica do comportamento mecânico dos metais, sabe-se que ambos os valores numéricos representam a propriedade da tenacidade desses materiais, seja ela fundamentada na energia absorvida até a fratura, representada pelo ensaio *Charpy* convencional, ou a resistência ao carregamento de impacto representada pelo ensaio *Charpy* Instrumentado utilizado neste trabalho.

Assim, é possível sugerir que a deficiência do condicionador de sinais em não fornecer uma resposta suficientemente rápida à solicitação do impacto do martelo pendular implica que os picos máximos dos sinais, representados pelas forças máximas, em tese, tenham maiores amplitudes, quando comparados aos obtidos nas curvas força *versus* tempo apresentadas na Figura 4, e estejam posicionados à direita, obviamente considerando um tempo de amostragem menor que o proporcionado pelo atual condicionador de sinais, devido a um menor tempo de resposta.

Isto posto, nesta etapa preliminar do trabalho ainda não foi possível isolar os efeitos da resposta mecânica dos materiais ensaiados de prováveis limitações da arquitetura de medição. Sabe-se que o aumento da taxa de carregamento implica na diminuição da resistência a fratura do corpo de prova. No entanto, os resultados da tenacidade à fratura dinâmica aparente obtidos do ensaio *Charpy* Instrumentado estão subestimados possivelmente devido a própria limitação do sistema de medida adotado. Esses efeitos, portanto, somente serão isolados e melhor compreendidos avaliando e utilizando-se condicionadores de sinais com tempos de resposta suficientemente pequenos para aquisição de sinais transientes impulsivos.

Dessa forma, para a próxima etapa de trabalho, pretende-se modificar a arquitetura do sistema de aquisição de sinais no sentido de substituir o condicionador por outro capaz de fornecer uma resposta suficientemente rápida quando se considera o tempo de ocorrência do processo de ruptura do corpo de prova. Além disso, a influência da velocidade de impacto na tenacidade à fratura dinâmica aparente e outras configurações de célula de carga aplicadas em posições distintas ao do martelo pendular serão estudadas e implementadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento da pesquisa, à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira pela pronta disposição dos laboratórios, equipamentos e funcionários e à CESP - Companhia Energética do Estado de São Paulo - pelos serviços prestados na instrumentação do martelo pendular.

5. REFERÊNCIAS

- ASM - Metals Handbook, 1975, "Toughness and fracture mechanics", *in*: Failure Analysis and Prevention, vol. 10, 8^a ed., pp. 30-44.
- Augland, B., 1962, "The impact Charpy test", British Welding Journal, vol. 9, p. 343.

- Delforge, D. Y. M., 1994, “Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy”, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia - UNESP, Ilha Solteira-SP, Brasil, 96p.
- Dieter, G. E., 1981, “Fratuira frágil e ensaio de impacto”, *in*: Metalurgia Mecânica, 2^a ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, pp. 419-450.
- Figliola, S. R. & Beasley, D. E., 1991, “Theory and design for mechanical measurements”, JohnWiley & Sons, EUA, pp. 31-103.
- Hertzberg, R. W., 1989, “Transition temperature approach to fracture control, in: deformation and fracture mechanics of engineering materials”, pp. 325-352.
- Ireland, D. R., 1974, “Procedure and problems associated with reliable control of instrumented impact test: instrumented impact testing”, ASTM Special Technical Publication, n. 563, pp. 3-29.
- Ireland, D. R., 1977, “Critical review of instrumented impact Charpy test”, Cambridge: The Welding Institute, Conference Technical Publication, pp. 47-61.
- Meyers, M. A., & Chawla, K. K., 1982, “Princípios de metalurgia mecânica”, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, pp 127-170.
- Quinan, M. A. D., 1996, “Análise de ensaio instrumentado de impacto tipo Charpy”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais-MG, Brasil, 98p.
- Sanz, G., 1970, “La rupture des aciers. Dans la mécanique de la rupture”, vol. 1, pp. 5-63.