

Instrumentação com microcontrolador PIC16F877 de uma máquina de ensaio Charpy

CHARPY IMPACT TEST MACHINE INSTRUMENTATION USING A PIC16F877 MICROCONTROLLER

Samuel Euzédice de Lucena

LaMI – Laboratório de Microprocessadores & Instrumentação, Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP – Universidade Estadual Paulista, *campus* de Guaratinguetá.

Sandro Marcelo Martins

Produquímica – Suzano, São Paulo.

RESUMO

Apresenta-se neste artigo o projeto e desenvolvimento da instrumentação para uma máquina convencional de ensaio Charpy. Usinou-se uma fenda na cunha do martelo pendular, na qual instalou-se um sensor piezoelétrico, para captar a força durante o impacto do martelo contra o corpo-de-prova. Um microcontrolador PIC16F877 detecta o início do impacto e, a partir deste instante, digitaliza 350 amostras da força, para depois transmiti-las a um PC, pela porta serial UART. No PC, salvam-se os dados do ensaio em arquivo do tipo ASCII, podendo-se assim observar e processar a forma de onda da força em função do tempo, com o auxílio de programas gráficos (Origin® ou Excel®). Isto permite a obtenção de inúmeros outros parâmetros sobre o corpo-de-prova, além da energia total por ele absorvida, indisponíveis na máquina convencional, como a força máxima, a energia até a força máxima, o tipo de fratura, etc. Os resultados experimentais mostraram que a instrumentação desenvolvida é adequada e agrega enorme valor à máquina de ensaio Charpy convencional.

PALAVRAS CHAVE

Instrumentação de Máquinas para Ensaio de Impacto Charpy, Ensaio de Impacto Charpy, Ensaio de Impacto Instrumentado, Rigidez Dinâmica à Fratura

ABSTRACT

This paper presents an instrumentation design and development for a conventional Charpy impact machine. The pendulum impact hammer has been

adapted to receive a piezoelectric sensor to capture the hammer impact force against the specimen. A PIC16F877 microcontroller detects the instant impact and then digitizes the 350 force samples, which are transmitted via UART serial port to a PC, where the samples are stored as an ASCII file. With the aid of graphics software (Origin® or Excel®), this procedure enables detailed analysis and data processing of force versus time of impact, thus allowing to obtain other important parameters on specimen behavior, besides the conventional Charpy machine data, the maximum applied force, energy to maximum force, the type of fracture, etc. The experimental results demonstrate that the developed instrumentation is feasible and aggregates enormous value to a classic Charpy impact machine.

KEYWORDS

Charpy Impact Test Machine Instrumentation, Charpy Impact Test, Instrumented Impact Test, Dynamic Fracture Toughness

INTRODUÇÃO

Não é possível se prever o comportamento de um material diante de uma carga dinâmica, com base nos ensaios de tração e flexão que avaliam sua resposta frente a cargas estáticas. Por outro lado, são inúmeras as situações em que materiais empregados para construção de objetos do cotidiano, como automóveis, aviões, bicicletas, guindastes, pontes, plataformas, etc, são expostos a esforços dinâmicos, propositais ou acidentais, como aqueles provocados por impactos e explosões, ou esforços repetitivos, ocasiões em que o mate-

rial absorve grande quantidade de energia em um tempo muito curto (MCMICHAEL; FISCHER, 1989).

Proposto em 1901, por G. Charpy, para medição da resistência do aço à fratura dinâmica, o método de ensaio Charpy, desde então, difundiu-se por todo o mundo, foi padronizado, quanto aos aspectos dimensionais e geométricos do corpo-de-prova (ISO 148-1, 2, *s.d.*), recebeu modificações para aplicação em outros materiais, tais como plásticos e materiais compostos, e é largamente empregado na especificação de material para projeto, no controle de qualidade, por exemplo, do processo de fabricação do aço, na monitoração da perda de qualidade, do aço, por exemplo, decorrente do processo de envelhecimento, etc (KOBAYASHI, 2002).

O ensaio Charpy convencional mede a energia absorvida pelo corpo-de-prova durante o impacto de um martelo pendular (figura 1). O corpo-de-prova, com geometria e entalhe determinados por norma, como já dito, repousa sobre dois apoios (bigornas), para receber o golpe do martelo, que parte de uma altura inicial conhecida, h_1 , e com velocidade nula. Assim, sendo sua massa, m , conhecida, conhece-se sua energia potencial. Ao desferir o golpe contra o corpo-de-prova, que se encontra no ponto mais baixo da trajetória do pêndulo, parte da energia do martelo é absorvida pelo corpo-de-prova, elevando-se o pêndulo a uma altura máxima, h_2 , agora menor que a inicial. Assim, presumivelmente, a diferença na energia potencial do martelo, $m.g.(h_1-h_2)$, onde g é aceleração da gravidade, corresponde à energia absorvida pelo corpo-de-prova. A velocidade do martelo, no início do impacto, v_1 é um parâmetro importante e pode-se calculá-la facilmente, lembrando-se que a energia potencial inicial do martelo converte-se totalmente em energia cinética, dada por $\frac{1}{2}.m.v_1^2$, no ponto inferior de sua trajetória (KALTHOFF, 2004).

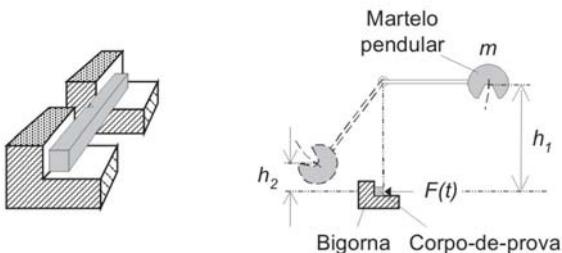


Figura 1 – Diagrama esquemático do ensaio Charpy convencional.

ENSAIO DE IMPACTO CHARPY INSTRUMENTADO

A ocorrência de uma série colapsos catastróficos de grandes estruturas, na qual o *Titanic* é o exemplo mais emblemático, levou a descobertas do extraordinário efeito da temperatura sobre a resistência dos materiais à fratura dinâmica. Nas décadas de 1950 e 1960, cientistas começaram a registrar a força de impacto do martelo contra o corpo-de-prova, colando extensômetros resistivos no próprio corpo-de-prova ou no martelo. O registro desta força em função do tempo, e da temperatura, além de permitir o cálculo da energia absorvida pelo corpo-de-prova, permite a obtenção de diversas outras informações sobre o comportamento do material não reveladas pelo ensaio Charpy convencional, quer dizer, não instrumentado.

A figura 2(a) mostra uma forma de onda típica para a força de impacto em função do tempo, para uma amostra de aço, à temperatura ambiente, obtida com uma máquina Charpy instrumentada. Além da energia total absorvida pela amostra, a forma de onda permite a obtenção de outras informações relevantes, como a tensão de escoamento, F_y , a força máxima aplicada, F_{max} , a energia absorvida para iniciar a trinca, E_i e a energia absorvida para propagar a fratura, E_p , e o modo de falha, dúctil, neste caso. A figura 2(b) mostra quão diferente pode ser o modo de falha, neste caso, frágil, para o mesmo material (aço), quando submetido ao impacto em temperatura muito baixa.

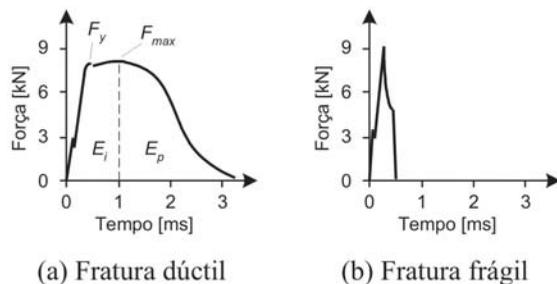


Figura 2 - Força de impacto em função do tempo para um aço (a) à temperatura ambiente, (b) a - 40 °C.

Por todo o conjunto de informações que o ensaio Charpy instrumentado é capaz de fornecer sobre o material ensaiado, seu emprego é universal, crescente e desejável quer em laboratórios de pesquisa, de desenvolvimento, de controle de qualidade, e em instituições de ensino, e já mereceu, para o caso do aço, uma norma específica (ISO 14556, *s.d.*). Provavelmente, por uma questão de escala de produção, e em

parte pela tecnologia adotada, as máquinas Charpy instrumentadas têm preços elevados, o que reduz o número de estabelecimentos que pode adquiri-las. No mercado norte-americano, por exemplo, estas máquinas custam de US\$25.000 a US\$160.000 (MCMICHAEL; FISCHER, 1989).

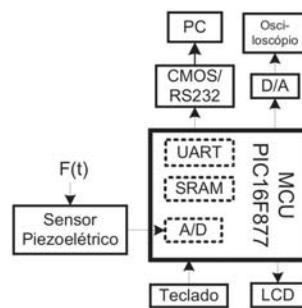
Graças à altíssima escala de integração empregada nas modernas famílias de microcontroladores, à disponibilidade de ferramentas gratuitas para desenvolvimento de sistemas microcontrolados, e ao baixo custo de transdutores de força, é possível se realizar a instrumentação de uma máquina Charpy convencional, com baixo investimento financeiro, agregando enorme valor à máquina. As seções seguintes deste artigo descrevem o projeto de instrumentação de uma máquina Charpy convencional, os resultados obtidos, e a conclusão.

DESCRIÇÃO DO PROJETO DA INSTRUMENTAÇÃO

Este projeto foi executado visando-se a instrumentação de uma máquina de ensaio Charpy convencional, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP – campus de Guaratinguetá, fabricada em Manheim, Alemanha, por *Mohr & Federhaff AG*, modelo *PSW 30/15*, cuja energia máxima e peso do pêndulo são, respectivamente, 300 J e 30 kg.

A figura 3 mostra o diagrama de blocos do instrumento para aquisição da força de impacto do martelo contra o corpo-de-prova. Um sensor piezoelétrico transforma a força de impacto, $F(t)$, em sinal elétrico proporcional. Este sensor foi colado a uma cunha adaptada para recebê-lo, substituindo a cunha original do martelo em todos os ensaios (MARTINS, 2006).

O programa de controle, desenvolvido em linguagem *assembly* no ambiente MPLAB® (Microchip), descarta todas as amostras digitalizadas antes do início do impacto. Ao detectar o início deste, adquire e salva, no banco de SRAM do microcontrolador, 350 amostras consecutivas do sinal, com intervalo de amostragem de 32 μ s que corresponde a uma frequência de amostragem de 31 kHz. Esta frequência parece suficiente para adquirir até os ensaios mais curtos, como aqueles de materiais frágeis.



(a)



(b)

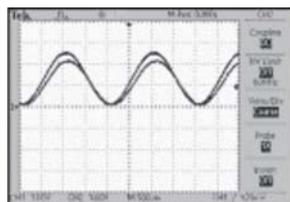
Figura 3 – (a) Diagrama de blocos da instrumentação do Charpy; (b) cunha adaptada com sensor piezoelétrico e fixada ao martelo.

Usando um LCD, o programa de controle informa quando o ensaio é encerrado, permitindo a transmissão dos dados da forma de onda da força durante o impacto para um PC, pelo canal UART (8 bits, 1 bit de parada, sem paridade, 2400 bauds), ou a observação desta força, em um osciloscópio digital ou analógico. Para permitir a visualização da força em um osciloscópio analógico (sem memória), uma sub-rotina escreve periodicamente as 350 amostras da força, em um conversor D/A de 8 bits (Analog Devices AD558JN), cuja saída monitora-se com o osciloscópio. Este D/A e sua sub-rotina deverão ser retirados do instrumento, uma vez concluído seu desenvolvimento, para redução de custo.

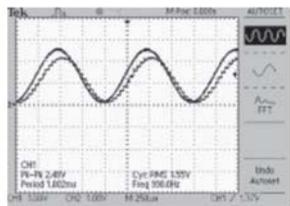
RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Duas séries de testes foram fundamentais para a avaliação do protótipo desenvolvido. A primeira, para investigar a capacidade do instrumento em adquirir corretamente sinais que ocupam a banda de frequências da força de impacto. Nestes testes, usou-se um gerador de sinais de alta precisão (HP 33120A), em lugar do sensor piezoelétrico, transmitindo-se os sinais adquiridos pelo microcontrolador, tanto para um PC quanto para o D/A, e observando-se a saída deste com

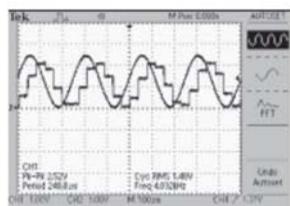
um osciloscópio digital (Tektronix TDS 2002). Simultaneamente, um segundo canal do osciloscópio gravava o sinal de entrada do A/D. A figura 4 mostra três das muitas medições realizadas, nas quais observam-se, em cada tela do osciloscópio, dois sinais: o sinal do gerador (entrada do A/D) e o sinal de saída do D/A (sinal de entrada digitalizado e reconstruído). Em todos os testes, o sinal do gerador é senoidal e excursiona entre 0 e +2,5 volts, ocupando todo a faixa de entrada do A/D.



(a)



(b)



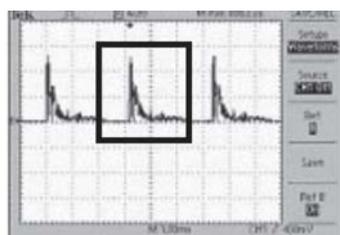
(c)

Figura 4 – Aquisição e reprodução de sinais senoidais com o protótipo: (a) 500 Hz; (b) 1 kHz; (c) 4 kHz. Todos os sinais de entrada excursionam entre 0 e +2,5 V.

Percebem-se três discrepâncias entre os sinais do A/D e D/A, idealmente iguais: diferença na amplitude de pico, diferença de fase, e diferença na qualidade do sinal. A diferença de amplitude pode ser corrigida facilmente, ajustando-se o ganho do D/A, cuja referência de tensão de 2,5 V (National Semiconductor LM336) prevê recurso para tanto. Já a diferença de fase justifica-se pela soma dos atrasos da conversão A/D, da manipulação da amostra dentro do microcontrolador, e da conversão D/A. Uma vez que a taxa de amostragem é fixa, o atraso entre os sinais de entrada e saída parece maior, para sinais de maior fre-

quência. Logicamente, este atraso é fixo e não tem qualquer efeito sobre a qualidade dos sinais adquiridos, uma vez que a frequência de amostragem satisfaz o critério de Nyquist. Já a diferença entre as formas de onda dos sinais de entrada e saída, tanto mais evidente quanto maior for a frequência do sinal de entrada, se deve ao fato de que a frequência de amostragem é fixa, resultando em um número de amostras por ciclo do sinal cada vez menor, à medida que a frequência deste cresce. Contudo, o fundamental para a recuperação do sinal é garantir que a frequência de amostragem satisfaz o critério da frequência de amostragem mínima de Nyquist – parâmetro obedecido por este projeto (YAMAMOTO; KOBAYASHI, 1993).

Uma vez demonstrada a capacidade do protótipo para fazer aquisição de sinais dentro da banda de frequências da força de impacto, realizou-se uma segunda bateria de testes, agora com o intuito de registrar o próprio sinal de impacto captado pelo sensor piezoelétrico. Usou-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, com a diferença que, desta vez, a fonte de sinal é o transdutor de força, e não mais o gerador de sinais. Novamente, inúmeros ensaios foram realizados, tendo-se em todos observado o mesmo resultado: a forma de onda capturada pelo protótipo e mostrada em um canal do osciloscópio (figura 5(a)) é idêntica àquela capturada diretamente pelo osciloscópio (figura 5(b)), atestando a adequação da instrumentação desenvolvida. Na figura 5(a) o sinal aparece triplicado, porque a rotina de teste do protótipo envia as amostras da força digitalizada repetidamente ao D/A. Para facilitar a comparação, reduziu-se propositalmente o tamanho da figura 5(b), contendo o sinal de força captado diretamente pelo osciloscópio, para que este assumisse, na tela do osciloscópio, o mesmo tamanho de um ciclo do sinal da figura 5(a). A figura 5(c) mostra a forma de onda da força de impacto traçada pelo programa matemático *Origin*[®], a partir dos dados recebidos pelo canal serial UART e salvos em arquivo do tipo ASCII. Os dados originais não receberam qualquer tratamento matemático, como filtragem de ruídos. A forma de onda foi novamente escalonada, para tomar o tamanho aproximado daquelas mostradas no osciloscópio. Em todos os testes, ficou claro que a transmissão dos dados adquiridos pelo protótipo, para o PC, não introduz erros nos dados. Uma vez no PC, os dados podem ser facilmente explorados para extração das informações sobre o corpo-de-prova apresentadas nas seções iniciais deste artigo.



(a)



(b)



(c)

Figura 5 - (a) Força de impacto capturada pelo protótipo e enviada periodicamente ao D/A, para apresentação no osciloscópio; (b) Força de impacto capturada diretamente pelo osciloscópio; (c) Força de impacto transmitida ao PC e redesenhada pelo *Origin*[®].

CONCLUSÃO

O ensaio de impacto Charpy é um método excelente e simples para avaliação da rigidez dinâmica dos materiais. Entretanto, apenas a instrumentação da máquina de ensaio Charpy, com o subsequente processamento matemático da força de impacto, são capazes de revelar novas informações sobre o material, como o tipo de fratura, a força máxima do impacto, a energia para propagação da fratura, etc. Este artigo apresentou um projeto usando um microcontrolador PIC16F877 para instrumentação de uma máquina Charpy convencional, executado a custo relativamente módico, mas cujos resultados demonstram sua inteira adequação e apontam para um caminho viável visando a modernização de máquinas tradicionais instaladas em empresas e instituições de ensino e pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Materiais e Tecnologia, da UNESP – *campus* de Guaratinguetá, por disponibilizar a máquina de ensaio Charpy, e ao Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães, pela dis-

cussão e assistência durante os testes com a máquina.

REFERÊNCIAS

ISO 148-1, 2 Metallic Materials – Charpy Pendulum Impact Test, Part 1 - Test Method, Part 2 - Verification of Test Machines.

ISO 14556, Steel-Charpy V-notch Pendulum Impact Test – Instrumentation Test Method.

KALTHOFF, J. F. Characterization of the Dynamic Failure Behavior of a Glass-Fiber/Vinyl-Ester at Different Temperatures by Means of Instrumented Charpy Impact Testing, *Composites: Part B*, v. 35, pp. 657-663, 2004.

KOBAYASHI, T. Progress in the Instrumented Charpy Impact Test, *Materials Science Research International*, v.8, n. 3, pp. 141-150, 2002.

MARTINS, S. M. Instrumentação de um Pêndulo de Ensaio Charpy, *Dissertação de Mestrado, Universidade de Taubaté*, 2006.

MCMICHAEL, S., FISCHER, S. Understanding Materials with Instrumented Impact, *Dynatup Products Div., Santa Barbara, CA, ME*, pp. 47-50, April 1989.

YAMAMOTO, I., KOBAYASHI, T. Evaluation Method of Dynamic Fracture Toughness by the Computer-Aided Instrumented Charpy Impact Testing System; *Int. J. Pres. & Piping*, v. 55, pp. 295-312, 1993.