

METODOLOGIA PARA INSTRUMENTAÇÃO DE UM PÊNDULO DE IMPACTO CHARPY

Daniel Yvan Martin Delforge¹

Ruís Camargo Tokimatsu¹

Itamar Ferreira²

RESUMO

O ensaio de impacto Charpy convencional permite determinar a energia total absorvida para causar a fratura completa de um corpo de prova entalhado, de dimensões padronizadas. Entretanto, esse parâmetro possui um valor de uso muito limitado. Ele, normalmente, não é aceito como um indicador quantitativo da resistência à fratura do material. Entretanto, através de instrumentação adequada pode-se aumentar a quantidade de informações obtidas a partir do ensaio de impacto Charpy. No presente trabalho, discute-se a instrumentação de um pêndulo de ensaio de impacto Charpy, utilizando-se técnicas de extensometria e de aquisição e digitalização de sinais, com o intuito de se obter curvas do tipo força x tempo. Discutem-se as condições básicas necessárias para instrumentação desse ensaio dinâmico, compreendendo a confecção de células de carga, e localização mais adequada para colagem dos extensômetros. Uma primeira avaliação da eficiência da instrumentação e do sistema de aquisição de dados foi feita, realizando-se alguns ensaios em condições de carregamento dinâmico, aplicados a corpos de prova Charpy, entalhados.

Palavras-chaves : 1. Charpy instrumentado; 2. tenacidade à fratura ; 3. Ensaio de impacto.

Contribuição técnica apresentada no I Seminário de Mecânica da Fratura, promovido pela ABM, em Ouro Preto - MG; 1 e 2 de junho de 1995.

1 professor e pesquisador do DEM/FEIS/UNESP - tel. (0187) 623113 / r. 138 - fax (0187) 622992.

2 professor e pesquisador do DEMA/FEM/UNICAMP - tel. (0192) 397966 - fax (0192) 393722.

1. Introdução

A tenacidade de um dado material geralmente é uma medida da quantidade de energia absorvida antes e durante o processo de fratura. A energia envolvida no processo de fratura pode ser medida por diferentes ensaios. Dentre os ensaios convencionais, a tenacidade é mais comumente medida sob altas taxas de deformação como num ensaio de impacto.

Apesar da grande importância do ensaio de impacto Charpy como indicador da resistência ao entalhe na seleção de materiais, os resultados obtidos não podem ser usados diretamente nos cálculos de projetos de engenharia. Isto porque, neste ensaio, não há medidas em termos do nível de tensão, o que dificulta correlacionar a energia absorvida com o desempenho em serviço.

A filosofia do projeto, baseada no ensaio Charpy, se restringe a selecionar um material que possua suficiente tenacidade ao entalhe quando sujeito a condições de serviço severas, de modo que a capacidade do membro estrutural em suportar o carregamento possa ser calculada pelos critérios convencionais da resistência dos materiais, sem considerar as propriedades de fratura do material ou os efeitos de concentração de tensões resultantes de trincas [01]. Assim, a estratégia de projeto para controle da fratura, segundo esta filosofia, visa simplesmente assegurar que o componente operará acima da temperatura de transição, no patamar superior. O objetivo é evitar a fratura de caráter frágil. Entretanto, este procedimento, evidentemente, não impede a ocorrência da fratura, pois, mesmo no patamar superior da curva de transição, a tenacidade dos materiais é finita. A fratura pode sempre ocorrer se a combinação de carga e tamanho de trinca atingir um valor crítico para o colapso. Desta forma, medidas para o controle da fratura baseadas somente na operação acima da temperatura de transição não oferecem uma conexão quantitativa entre o tamanho de trinca e carga aplicada.

O projeto estrutural quantitativo, baseado na tenacidade, só se tornou possível com o advento da mecânica da fratura. A mecânica da fratura exprime uma nova

metodologia de projeto que contorna o dilema da tensão infinita na ponta da trinca, quando se aplica a teoria clássica da resistência dos materiais. Na essência, trata-se de uma ferramenta de análise quantitativa que permite prever o comportamento de uma estrutura trincada sob o efeito de tensões.

O critério de fratura estabelecido pela mecânica da fratura relaciona duas entidades distintas: o campo de tensões à frente da trinca e propriedades de fratura do material. O campo de tensões à frente da trinca é determinado pela mecânica dos sólidos através de diferentes métodos (analíticos, numéricos e experimentais). As propriedades de fratura do material são determinadas através de ensaios laboratoriais. 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 crítica de fratura, em senso macroscópico. Cabe observar, entretanto, que existem diferentes parâmetros de tenacidade à fratura.

Desde da década de 1960, vários pesquisadores, vêm estudando métodos para se determinar um parâmetro denominado tenacidade à fratura dinâmica, a partir de ensaios de impacto. Nestes casos, normalmente obtêm-se curvas de força x tempo a partir de ensaios dinâmicos instrumentados tais como: Charpy, queda de peso, tração dinâmica, Schnadt, Batelle, Pellini, Robertson e outros [02]. Entre estes, uma modificação do ensaio de impacto Charpy clássico, vem recebendo grande atenção. Este novo ensaio, conhecido como Charpy instrumentado, surgiu como uma alternativa promissora, apesar das inúmeras complicações relacionadas à instrumentação.

1.1. Ensaio Charpy Instrumentado

O ensaio Charpy instrumentado permite uma melhor compreensão da mecânica do ensaio. Geralmente, a instrumentação consiste em transformar o martelo do pêndulo Charpy em uma célula de carga, por intermédio de extensômetros. Isto possibilita a obtenção de mais informações acerca do ensaio. Essencialmente, o ensaio

consiste em registrar o sinal do martelo em um osciloscópio digital com memória, em forma de força x tempo. As curvas força x tempo produzidas a partir do ensaio de impacto instrumentado são similares às curvas força x deflexão comumente obtidas em ensaios de flexão monotônica. Entretanto, na análise da curva obtida no ensaio Charpy instrumentado é preciso considerar algumas particularidades devido às altas taxas de deformação inerentes aos ensaios de impacto. A figura 01 mostra uma curva teórica típica de força x tempo, obtida a partir do ensaio Charpy instrumentado. Assim, além da energia absorvida, o ensaio fornece a variação da carga aplicada com o tempo. Deste modo, a instrumentação do martelo instalado no pêndulo da máquina de ensaios de Charpy, possibilita a obtenção de várias informações acerca dos esforços envolvidos durante o processo de fratura. Dependendo do material e das condições microestruturais é possível obter-se dessa curva, as seguintes informações [03].

- Limite de escoamento inferior;
- Limite de escoamento superior;
- Carga máxima;
- Energia para iniciação da fratura.

Esse tipo de curva pode fornecer informações sobre a carga de escoamento generalizado, carga máxima, e outros. Essa curva por sua vez está relacionada com a deflexão. A partir do registro carga-deflexão é possível determinar a porção elástica da curva tensão-deformação, o início da propagação de trinca, e a energia para propagação da trinca. A energia total gasta no impacto também pode ser obtida pela integração completa da curva. Os valores da energia total na fratura computados dessa forma, têm uma correspondência com os valores da energia no ensaio Charpy convencional.

Assumindo-se que a velocidade do pêndulo permanece constante no decorrer do ensaio, é possível calcular-se a energia absorvida pelo corpo de prova, até fratura completa, através da seguinte equação [04]:

$$E_t = V_o \int_0^t p dt \quad (01)$$

onde:

E_t - Energia total, considerando-se a velocidade do pêndulo constante;

V_o - Velocidade inicial do pêndulo;

P - Força instantânea;

t - Tempo.

Na realidade, a velocidade do pêndulo decai durante o ensaio. A intensidade da desaceleração do pêndulo é diretamente proporcional ao valor da carga que atua sobre o corpo de prova. O que, evidentemente, demonstra que a eq.(01) para ser utilizada precisa ser corrigida para compensar a redução de velocidade do pêndulo. Augland [05] sugeriu que a energia absorvida real, para causar a fratura completa pelo corpo de prova, pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$E_t = E_i(1-\alpha) \quad (02)$$

com $\alpha = \frac{E_t}{4 E_o}$

onde:

E_t = Energia total para fraturar o corpo de prova;

E_o = Energia potencial inicial do pêndulo.

O ensaio Charpy convencional mede a energia total (E_t) absorvida pelo corpo de prova, que é a soma da energia gasta para iniciar a fratura (E_i) mais a energia gasta na propagação da trinca de fratura (E_p), ou seja:

$$E_t = E_i + E_p \quad (03)$$

No entanto, no caso do ensaio de impacto Charpy clássico, E_t é lido diretamente na máquina de ensaio, como sendo um valor global, sem que se consiga E_i e E_p separadamente. Em decorrência da instrumentação do pêndulo de impacto Charpy, é possível conseguir dissociar-se os valores de energia de iniciação (E_i) e propagação (E_p), da trinca de fratura, em duas componentes distintas [04].

Assim, utilizando-se corpos de prova pré-trincados, e considerando o valor da carga necessária para que ocorra o início da propagação da trinca, é possível determinar-se o valor de um parâmetro de tenacidade à fratura sob carregamento dinâmico. Por intermédio dos procedimentos estabelecidos pela mecânica da fratura linear (ASTM E-399/90) é possível obter-se o valor do parâmetro de tenacidade à fratura dinâmico, K_{ID} .

O objetivo do presente trabalho é discutir as condições básicas para instrumentar uma máquina de ensaio Charpy, com o intuito de se ampliar a quantidade de informações obtidas durante a realização do ensaio.

2. Metodologia para Instrumentação

Por intermédio de instrumentação apropriada para registrar a carga e avaliar a deflexão resultante, é possível obter diagramas força x deflexão para o ensaio de impacto Charpy. A carga que atua sobre o corpo de prova durante o impacto, pode ser avaliada através de medidas de deformação ou força, registrados em um osciloscópio ou qualquer outro instrumento de resposta rápida. O deslocamento do corpo de prova durante o impacto pode ser medido diretamente, mas normalmente um diagrama força x tempo é plenamente satisfatório, e se for necessário é possível obter-se um diagrama força x deflexão a partir de um diagrama força x tempo. A instrumentação de uma máquina de ensaio Charpy consiste basicamente em munir a máquina de uma célula de carga, a qual por sua vez deve estar devidamente acoplada a um sistema de aquisição de sinal.

2.1. Projeto da célula de carga

Para que se avaliar a força que atua sobre o corpo de prova , é necessário instrumentar a máquina de ensaio Charpy. Vários locais têm sido munidos de medidores tais como martelo, base do martelo , apoios e o proprio corpo de prova. Vários pesquisadores já constataram que a instrumentação do martelo apresenta uma série de vantagens em relação aos outros locais citados. Neste trabalho o martelo do pêndulo foi escolhido para alojar os medidores de força, ou seja, ele foi transformado numa célula de carga. Para tanto, foi selecionado como elemento sensetivo extensômetros elétricos Kiowa do tipo KFC - 2 C1 - 11 - axial de alta sensibilidade. Esse tipo de extensômetro apresenta algumas características desejáveis, na instrumentação do pêndulo Charpy, tais como: baixa mudança do fator de calibração com a temperatura e excelente fator de sensibilidade (k), quando utilizado em células de carga, em aço de alta resistência.

2.1.1 Configuração geométrica da célula de carga

De um modo geral, as características dimensionais do martelo foram adotadas observando a norma ASTM E23. Entretanto, para melhorar a sensibilidade da célula de carga foi necessário efetuar algumas alterações na configuração geométrica do martelo (veja subseção 2.1.2). A figura 02, ilustra as dimensões da célula de carga, utilizada neste trabalho. Poder-se-ia ter implementado as modificações sobre o martelo que acompanha a máquina de ensaio. Entretanto, fez-se a opção de se construir um novo, preservando assim, o martelo da máquina com suas características originais.

2.1.2 Determinação do local de colagem dos extensômetros

O local de colagem dos extensômetros foi cuidadosamente selecionado, observando sobretudo dois aspectos. O primeiro aspecto, visou alojar os extensômetros em local que permitisse uma proteção adequada, de modo a evitar qualquer tipo de dano

durante o impacto com o corpo de prova. O segundo aspecto foi escolher um local que possibilitasse uma alta sensibilidade, ou seja, identificar o local de maior deformação do martelo. A definição do local de colagem foi feita com base em dois métodos: método experimental e modelamento por elementos finitos.

O rastreamento e análise das regiões de maior deformação, numa primeira etapa, foi realizado aplicando-se uma carga estática de 25kN numa célula de carga experimental, em cuja superfície colou-se vários extensômetros, em locais estrategicamente escolhidos, como pode ser visto esquematicamente na figura 03. Este procedimento foi importante para identificar as regiões de maior deformação do martelo.

Numa segunda etapa fez-se uma análise por elementos finitos, da célula de carga. O propósito foi efetuar um estudo mais refinado. Diferentes configurações foram consideradas, e após várias simulações, optou-se pelo modelo apresentado na figura 04. Observa-se um furo na célula de carga, próximo à zona de impacto. Recorreu-se a este expediente para transformar o elemento sensitivo em um anel dinamométrico, com o intuito de aumentar a sensibilidade da célula de carga. A figura 05, representa uma simulação, onde observa-se uma grande deformação da célula de carga, na região do furo vazado. O resultado dessa simulação foi determinante para definir o local de colagem dos extensômetros. A figura 06 mostra, de maneira esquemática, que os extensômetros foram colados na parede interna do furo.

2.1.3 Usinagem e tratamentos térmicos

O material escolhido para confeccionar o martelo foi o aço-liga ASTM A 681-76 Tipo S1. Este aço é recomendado para aplicações onde choque e impacto são as principais solicitações.

Para facilitar a usinagem, o aço foi recozido. Uma vez completada a usinagem, o martelo foi submetido a um ciclo de tratamento térmico que consistiu em austenitização a 950°C, durante 30 min. , e têmpera em óleo mineral. Imediatamente após a têmpera, o martelo foi revenido a 250°C durante 3 horas .

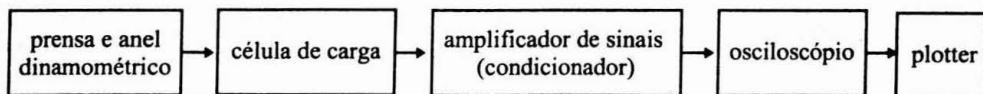
2.1.4 Colagem dos extensômetros

A preparação das superfícies a serem coladas, inicialmente foi feita com lixa para metais de nº 400, com movimentos circulares de modo a se obter risco com orientação aleatória. Sendo em seguida submetida a uma limpeza rigorosa. Só então os extensômetros foram colados. A secagem foi realizada em forno mufla por 6 horas a 150 °C. Uma vez completada esta etapa, foram feitos vários testes para checar as condições elétricas dos extensômetros. Avaliou-se a qualidade da colagem e do isolamento extensômetro-peça. Só após a constatação de que tudo estava em conformidade com o especificado, é que fez-se a ligação dos cabos com os terminais dos extensômetros. E finalmente, realizou-se a impermeabilização da instalação. Um impermeabilizante a base de silicone foi aplicado sobre os extensômetros e suas ligações com o intuito de se evitar que a instalação sofra baixa de isolamento ou qualquer tipo de agressão do meio. A figura 07 mostra a célula de carga já finalizada. A figura 08 , mostra a mesma célula de carga devidamente aparafusada ao pêndulo.

2.1.5. Aferição das células de carga

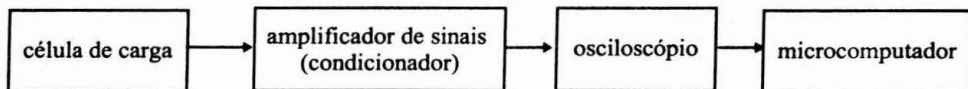
A aferição da célula de carga (martelo) pode ser feita através de métodos estáticos ou dinâmicos. Pelo fato do ensaio Charpy ser dinâmico, existe uma forte tendência de se aferir esse tipo de equipamento dinamicamente. Entretanto, a aferição dinâmica é mais complexa, e não existem evidências consistentes de que produza resultados diferentes do método estático [06,07,08]. Considerando-se esse fato, optou-se pela aferição estática das células de carga. O método de aferição empregado simplesmente consistiu em correlacionar a deformação da célula de carga observada na tela do osciloscópio ,com uma carga aplicada de valor conhecido. O diagrama de blocos,

apresentado abaixo, esquematiza a montagem utilizada na aferição da célula de carga. A figura 09, mostra em detalhes o sistema de aferição empregado.



2.2. Sistema de aquisição de sinal

A célula de carga foi conectada a um sistema de aquisição de sinal, cujo esquema está mostrado no diagrama de blocos apresentado abaixo:



Como pode ser constatado, o sistema eletrônico digital de aquisição de sinal era constituído de um amplificador de sinais, um osciloscópio digital com memória, e um microcomputador (veja figura 10). A figura 11 mostra uma curva força x tempo, capturada diretamente da célula de carga. Integrando essa curva, pode-se calcular a energia total consumida para causar a ruptura completa do corpo de prova. No caso $E_T = 81,6$ joules. A partir dessa mesma curva, aplicando-se a norma ASTM E-399/90 e considerando-se a carga de fratura, determinou-se o valor de K_{ID} , como sendo $32,7 \text{ MPa.m}^{1/2}$.

4. Considerações Finais

É relativamente simples instrumentar uma máquina de ensaio de impacto Charpy. Para tanto basta, por exemplo, transformar o martelo numa célula de carga, e

acoplar a este um sistema de aquisição de sinais. O aspecto interessante da instrumentação da máquina de ensaio Charpy, é o aumento da quantidade de informações obtidas. Isto permite entender melhor a mecânica do ensaio. Entretanto, existem dificuldades e incertezas que são inerentes aos ensaios dinâmicos. No caso do ensaio Charpy instrumentado, a caracterização dos esforços é dificultada pelos efeitos de inércia e das vibrações (ondas de choque) induzidas no corpo de prova e na célula de carga. Todavia, a análise desses fenômenos foge ao objetivo do presente trabalho. Porém a simples menção é suficiente para alertar que uma análise mais profunda é necessária, antes de se poder avaliar o grau de importância das informações obtidas. A influência desses fenômenos nos valores medidos, assim como a adoção de outras técnicas de instrumentação para contornar tais dificuldades serão objeto de trabalhos futuros.

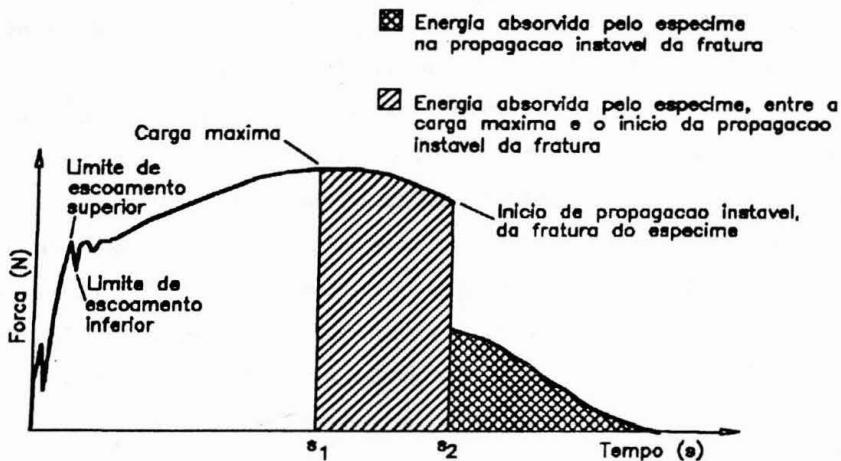


Figura 01. Curva teórica típica obtida do ensaio Charpy instrumentado [10,24].

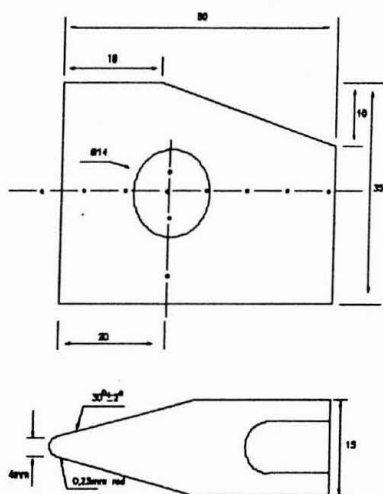
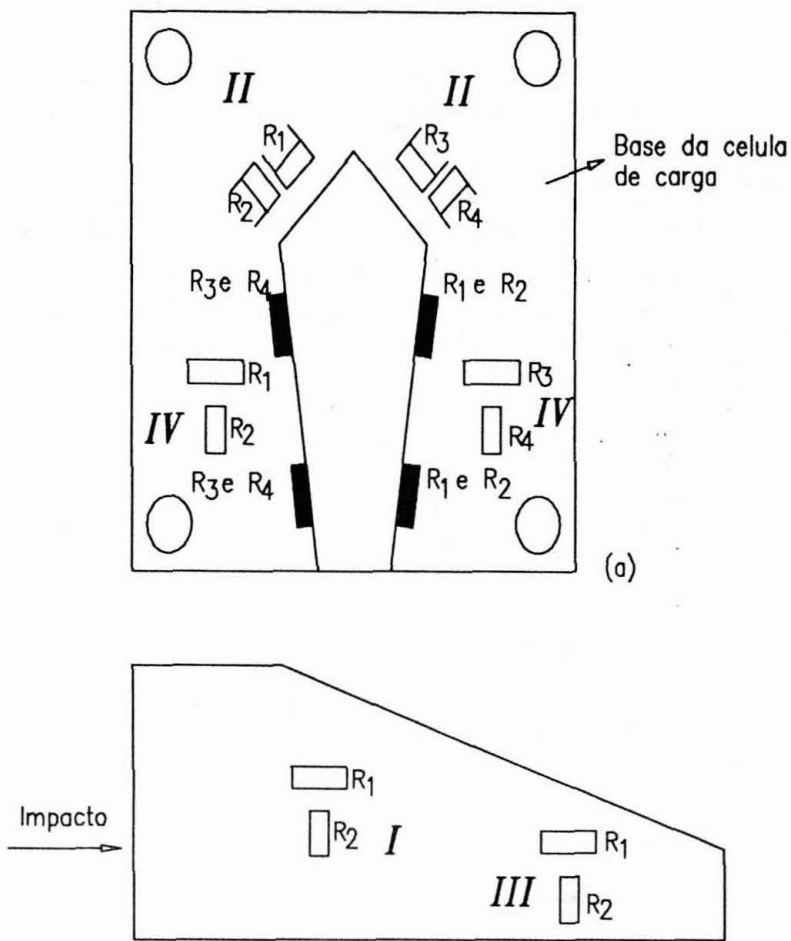


Figura 02. Configuração geométrica da célula de carga utilizada no ensaio de impacto Charpy instrumentado (dimensões em mm).



I, II, III e IV Locais de colagem dos extensômetros

Figura 03. Locais de colagem dos extensômetros, para determinação experimental das regiões de maior deformação da célula de carga experimental.

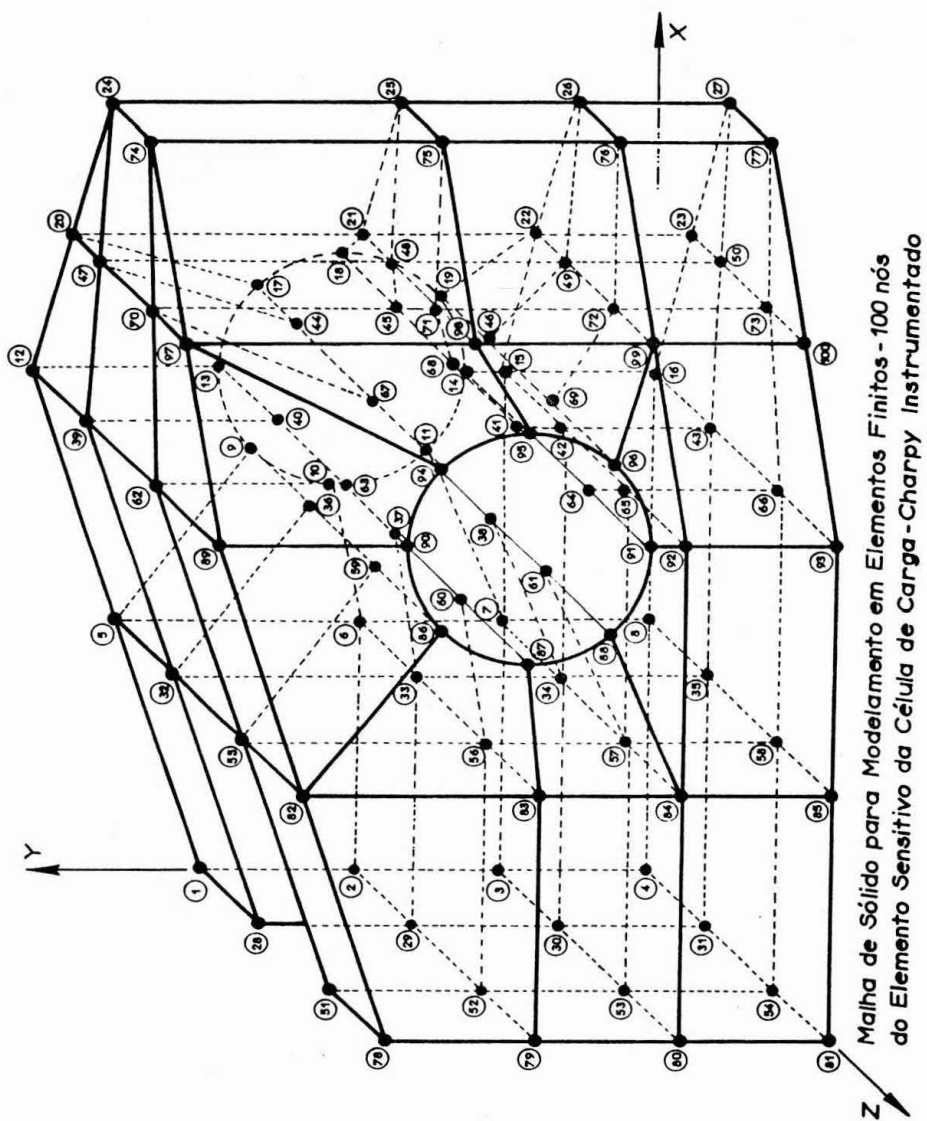


Figura 04. Discretização da célula de carga, para geração da malha para análise por elementos finitos.

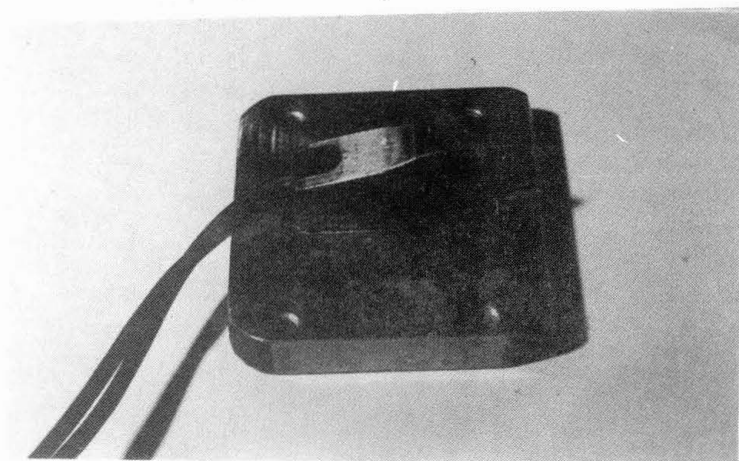


Figura 07. Célula de carga devidamente instrumentada.

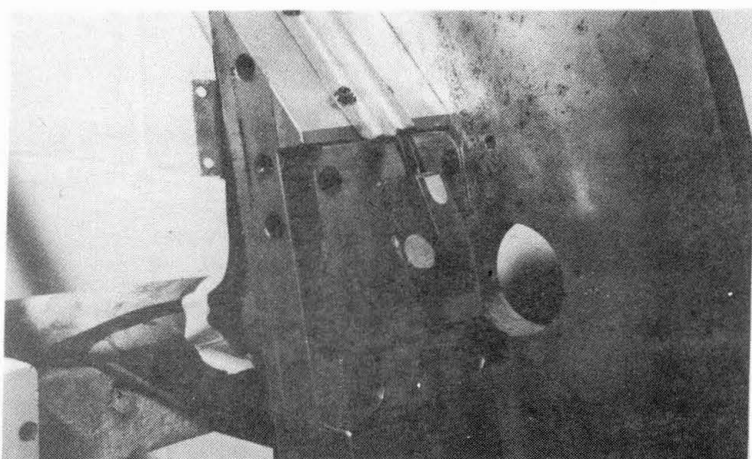
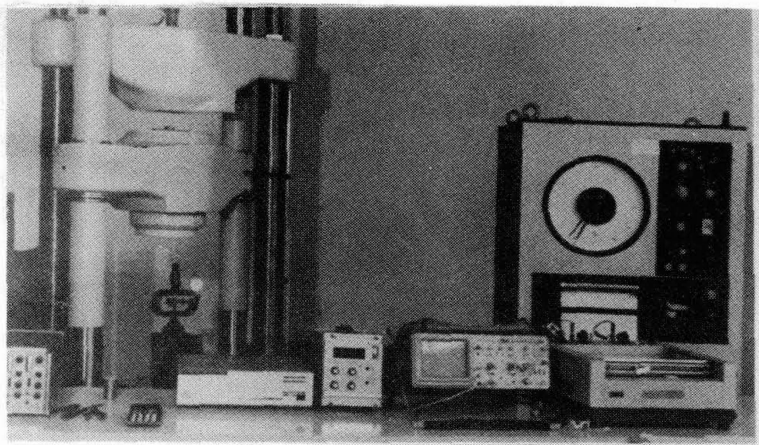


Figura 08. Célula de carga aparafusada no pêndulo.



equipamento	características
máquina universal de ensaio tração/compressão	<ul style="list-style-type: none"> • marca : Heckert • capacidade : 1000 kN
anel dinamométrico	<ul style="list-style-type: none"> • marca : Salcras • carga max. adm. : 50kN • classe de precisão : 1%
amplificador de sinais	<ul style="list-style-type: none"> • marca : Transdutec • modelo : TMDE • tensão de excitação da ponte : 5,0 V • frequência portadora : $5 \pm 1\%$ kHz (0,005s) • resposta em frequência: até 1.000 Hz (0,001s) • classe de precisão : 0,1%
osciloscópio digital Tektronix, de memória	<ul style="list-style-type: none"> • resposta em frequência : até 100 MHz • capacidade de memória : até 4 kbytes • classe de precisão : 0,1%

Figura 09. Sistema utilizado na aferição da célula de carga.

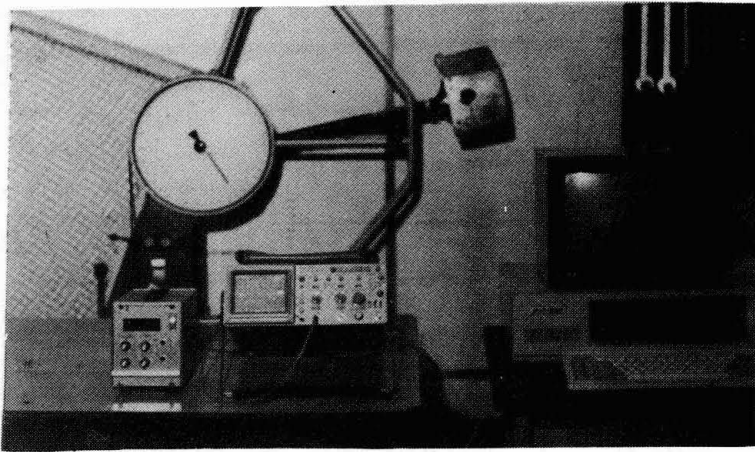


Figura 10. Sistema utilizado para aquisição do sinal.

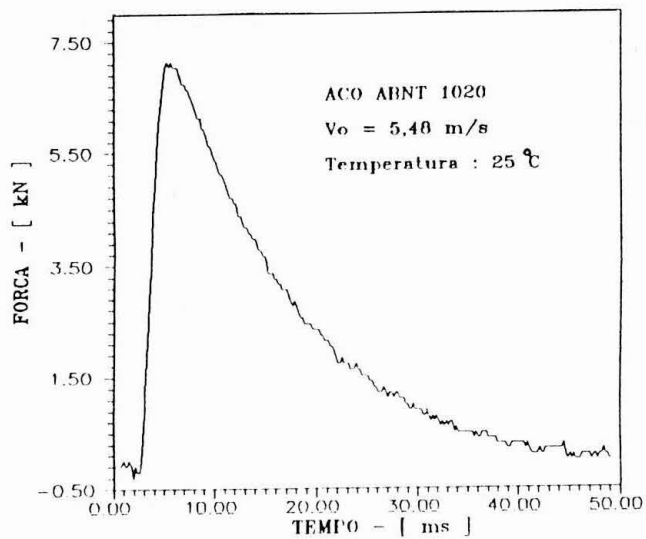


Figura 11. Curva força x tempo, capturada a partir da célula de carga.

Referências Bibliográficas

- [1] DIETER, G.E. Metalurgia mecânica, 2^a ed. /// Trad. A.S.S. Silva, L.H. Almeida & P.E.V. Miranda, Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981.
- [2] SANZ, G. La rupture des aciers. Dans la mécanique de la rupture. Paris: IRSID/CESSID, 1970.v.1,p.5-63.
- [3] COWAN, A. Interpretation de l'essai de résilience avec enregistrement. Le soudage dans le monde. In: 6^{ème} Conference de soudage, 6, 1970, Budapest. [s.n.t.] vol.8, n.1, p.5-7.
- [4] HERTZBERG, R.W. Deformation and fracture mechanics of the engineering materials. New York: John Wiley & sons, 3.ed., 1990, p.333-349.
- [5] AUGLAND, B. The Impact Charpy Test. London: British Welding Journal. vol.9, 1962. p.343.
- [6] IRELAND, D.R. Procedure and problems associated with reliable control of the instrumented impact test: instrumented impact testing. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, n.563, p.3-29, 1974.
- [7] BUYS, E.C.J. & Cowan, A. Interpretation of the instrumented impact test. London: International Institute of Welding, July 1968. p.3-14, (Document X, 458/68).
- [8] FEARNEHOUG, G.A. & HOY, B.S. Mechanism of deformation and fracture in the Charpy test as revealed by dynamic record of impact loads. Journal of the Iron and Steels Institute, p.912-920, nov. 1964.
- [9] SERVER, J.H. Charpy impact testing. In American Society for Metals. Metals Handbook: Impact Testing of Materials. 9.ed., vol.8, Metals Park, 1985
- [10] DELFORGE, D. Y. M. Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy. Campinas, 1994. 96p. Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.

METHODOLOGY FOR INSTRUMENTATION OF AN IMPACT CHARPY PENDULUM

ABSTRACT

It is possible to obtain the total energy absorbed in fracturing a standardized notched specimen from the Charpy conventional impact test, but this parameter has a very limited use. It is not accepted as a quantitative indicator for fracture resistance of the material. However, it is possible to yet others important informations from the conventional test by using appropriated instrumentation. The purpose of this paper is to discuss the instrumentation of a Charpy impact test by using extensometry, and signal acquisition and digitalization techniques in order to obtain load x time curves. The necessary conditions for instrumentation this dynamic test, fabrication the load cell, and the more appropriated strain gage location have been indicated. The efficiency of instrumentation, and of the acquisition data system have been done by using some tests in dynamic loading conditions on notched specimens.

Key-words : 1. Instrumented Charpy; 2. fracture toughness; 3. impact test.