



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DIGITAL DE MEDIÇÃO DA TENACIDADE DOS MATERIAIS NUMA MÁQUINA CHARPY

André Simoni Goulart | andre.g27@aluno.ifsc.edu.br¹

Marcos Menegaro da Silva | marcos.m2008@ifsc.edu.br²

Douglas Maia Barros | douglas.b20@ifsc.edu.br³

Davi Scaini Marinheiro | davi.sm@ifsc.edu.br⁴

Icaro da Silva Melo | icaro.sm@ifsc.edu.br⁵

Haley Whelter Jacques Dias | halleydias@ifsc.edu.br⁶

Trabalho de Pesquisa

DT 4 - Inovação Tecnológica, Processos Produtivos e Futuro das Tecnologias

Resumo:

Este trabalho aborda a importância da correta caracterização mecânica dos materiais, com ênfase na tenacidade sob condições de impacto, utilizando o ensaio Charpy para essa finalidade. O objetivo da proposta consiste em desenvolver e implementar um sistema de medição digital para uma máquina Charpy existente no IFSC Câmpus Araranguá, a qual fornecia anteriormente apenas resultados qualitativos. Busca-se, assim, torná-la mais precisa e alinhada às normas técnicas. A metodologia baseia-se na análise da variação da energia potencial do pêndulo durante o ensaio, considerando perdas por atrito e impacto. Para isso, utiliza-se um *encoder* acoplado ao eixo de rotação para captar o deslocamento angular. Esses dados são processados por um microcontrolador que calcula a energia absorvida pelo material e exibe os resultados em um display. O sistema opera em dois modos: calibração (sem corpo de prova) e ensaio (com impacto), permitindo maior confiabilidade aos resultados. O algoritmo desenvolvido controla todo o processo, desde a aquisição dos dados até o cálculo final da tenacidade.

Palavras-chave: tenacidade; ensaio Charpy; medição digital; energia de impacto; materiais.

¹Estudante do curso Técnico Integrado em Eletromecânica do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Araranguá

²Estudante do curso Técnico Integrado em Eletromecânica do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Araranguá

³Estudante do curso Técnico Integrado em Eletromecânica do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Araranguá

⁴Estudante do curso Técnico Integrado em Eletromecânica do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Araranguá

⁵Estudante do curso Técnico Integrado em Eletromecânica do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Araranguá

⁶Servidor EBTT do Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus Araranguá.

Introdução

Na metodologia de projetos de dimensionamento de elementos mecânicos, Budynas; Mischke e Shigley (2005) destacam duas premissas importantes para serem consideradas pelo projetista: a funcionalidade do elemento e o comportamento mecânico (CM) do material selecionado, ambas em termos do desempenho em serviço. Para um projeto mecânico ser bem sucedido, é fundamental a correta caracterização do material (Garcia, Santos e Spim, 2013).

Dentre as características do CM, a medida da tenacidade do material é uma informação importante, principalmente quando as condições de serviço são severas como, por exemplo, carregamentos de impacto ou operações em temperaturas negativas (Budynas, Mischke e Shigley, 2005; Garcia, Santos e Spim, 2013).

Callister (2006) define tenacidade como a energia total absorvida pelo material enquanto sofre uma fratura. Embora seja possível avaliar a medida da tenacidade por meio de um diagrama tensão versus deformação, Souza (1982) argumenta que o ensaio responsável pela medida real da tenacidade é o ensaio de energia de impacto. Um dos modelos de máquinas usadas na medição de tenacidade é a de impacto por pêndulo Charpy, objeto deste trabalho (Souza, 1982; Garcia, Santos e Spim, 2013).

Para garantir a precisão e a validade desses ensaios, máquinas e equipamentos de laboratórios devem seguir padrões de fabricação e operacionalização em conformidade com normas técnicas, que no Brasil, são regidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para o ensaio de tenacidade, a referência é a norma ABNT NBR ISO 148-2, a qual categoriza as máquinas como máquinas industriais, permitindo que os resultados obtidos durante os ensaios sejam confiáveis e reproduzíveis.

Nesse contexto, uma máquina de ensaio Charpy projetada e fabricada para o Laboratório de Materiais do Câmpus Araranguá do IFSC. Porém, esta máquina tem sua aplicação apenas ao Ensino, pois os resultados por enquanto são apenas medidas qualitativas da tenacidade. Tendo em vista a pretensão de modificar esta máquina para atender a norma específica (ABNT, 2013), o objetivo deste trabalho é implementar um algoritmo de medição digital para a máquina Charpy do Câmpus Araranguá, apresentando o problema, propondo um algoritmo e testando sua funcionalidade.

A máquina Charpy do IFSC Araranguá

A máquina Charpy fabricada no Câmpus Araranguá do IFSC, ilustrado pela foto da Figura 01, atende as especificações construtivas da norma (ABNT, 2013) e é composta pela (a) base, (b) colunas, (c) mancais, (d) haste do pêndulo e (e) martelo.

Figura 01 – Máquina Charpy do Câmpus Araranguá



Fonte: os autores.

Capelli (2013) e Thomazini e Albuquerque (2020) apresentam a metodologia matemática para a medição da tenacidade do material com a utilização da máquina pêndulo Charpy. De maneira simplificada, o pêndulo é solto a partir de um ângulo de referência (θ_{ref}) ou de lançamento, perde energia ao colidir e fraturar contra um corpo de prova e pára numa posição final de ângulo de elevação (θ_{ens}) inferior ao de lançamento. Há de se considerar também a de energia por atrito no eixo e mancais de rotação do pêndulo durante o ensaio. Para tanto, é necessário considerar que a perda de energia total terá como referência um ângulo alcançado sem impacto (θ_{cal}). A perda ou a variação da energia potencial ΔE é convertida na medida da tenacidade do material. Esta variação

pode ser calculada por meio da Equação 01, da forma

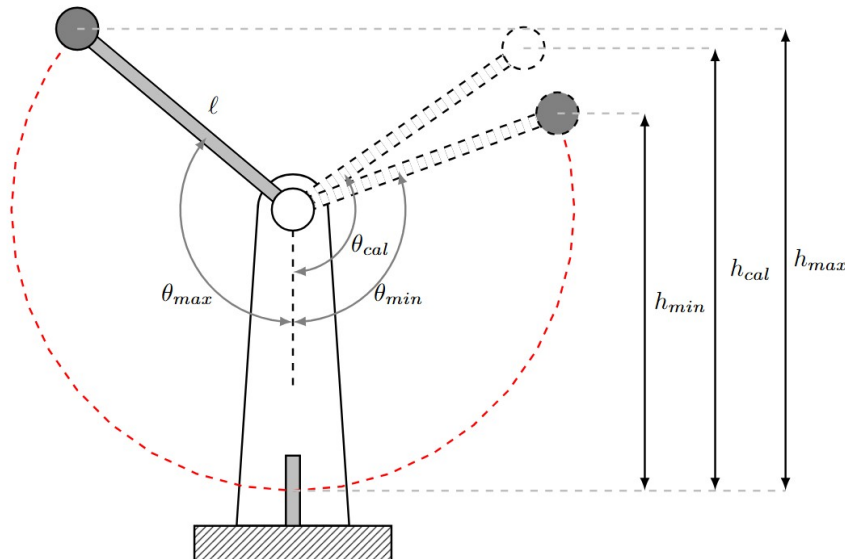
$$\Delta E = \Delta E_{cal} - \Delta E_{ens}, \quad (01)$$

onde ΔE_{cal} é a perda de energia sem o corpo de prova, apenas com a perda com o atrito e ΔE_{ens} é a perda de energia no ensaio, com o impacto com o corpo de prova. Então,

$$\Delta E = (mg(h_{max} - h_{cal})) - (mg(h_{max} - h_{ens})), \quad (02)$$

onde m é a massa do conjunto haste-martelo, g é a aceleração da gravidade e h são as alturas atingidas pelo martelo em diferentes estados como ilustrado na Figura 02.

Figura 02 – Diagrama da máquina Charpy



Fonte: os autores.

Se l é o comprimento do conjunto haste-martelo, a Equação 02 modificada resulta em

$$\Delta E = mgl \left((1 - \cos(\theta_{max})) - (1 - \cos(\theta_{min})) \right), \quad (03)$$

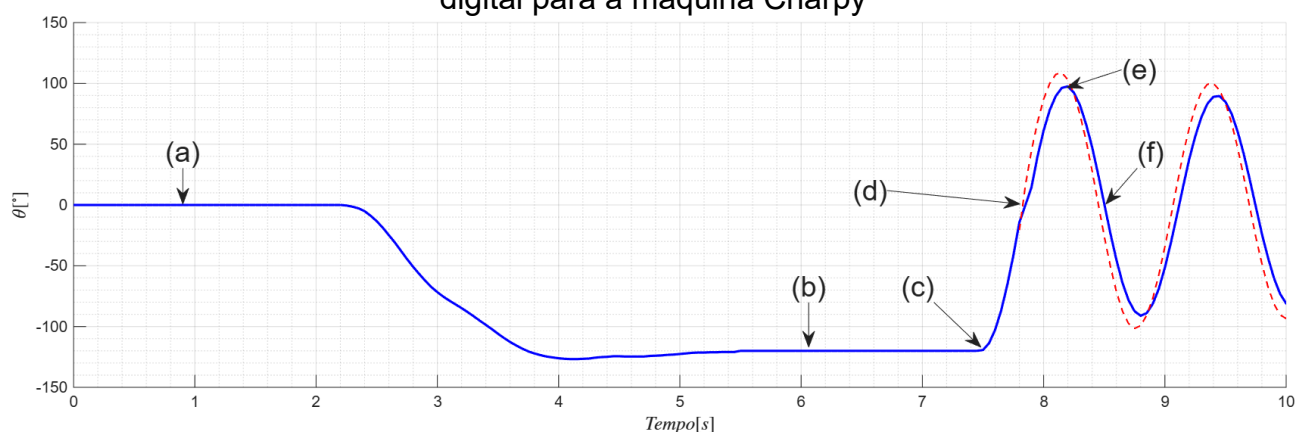
O sistema de medição desenvolvido utiliza um encoder acoplado ao eixo de rotação do pêndulo para gerar pulsos de tensão elétrica para cada incremento de deslocamento rotacional do pêndulo a partir da posição de lançamento até a de elevação final. Esses pulsos são identificados e contados no microcontrolador que calcula o deslocamento total do pêndulo. A partir das posições iniciais e finais do deslocamento do

pêndulo, a variação da energia potencial é calculada no microcontrolador e mostrada no display LCD.

Algoritmo para medição digital da máquina Charpy

Para ilustrar o algoritmo de medição digital de ensaio para máquina Charpy, foram realizadas duas rodadas ilustradas na Figura 03: uma de calibração (linha pontilhada vermelha) e uma de ensaio (linha contínua azul).

Figura 03 – Gráfico de dados experimentais para ilustração do algoritmo de medição digital para a máquina Charpy



O usuário deve iniciar o procedimento com a máquina em seu estado estacionário, ou seja, o martelo imóvel, posicionado na vertical, apenas com a força da gravidade atuando nele. Neste estado de espera, o display ilustra apenas o texto “IFSC – Araranguá // Ready for Test”⁷ (Pronto para ensaio).

Então, o usuário poderá apertar no display o botão de controle (a). Se o tempo que o botão estiver pressionado for menor do que 2 segundos, o sistema emite um bip longo e inicia o procedimento de ensaio. Caso o tempo for maior, o sistema então emite dois bips longos e inicia o processo de *calibração*.

Sistema em Ensaio

⁷Para ilustrar os textos do display, as duas barras “//” indicam quebra de linha.

Neste caso, o sistema zera o valor do ângulo de medição, que passa a valer $\theta=0.0^\circ$. O *display* então passa a ilustrar o texto “Hammer Posit. // $\theta = \text{ang}^\circ$ ”, onde *ang* é o valor do ângulo medido a cada intervalo de aquisição.

O usuário então deve levantar manualmente o martelo para sua posição de lançamento, travar o gatilho da máquina, posicionar o corpo de prova no seu local apropriado e, se certificando que a máquina esteja em repouso, apertar novamente o botão de controle (b). Então, é emitido um bip curto e, a partir deste momento, o sistema registra o valor do ângulo mínimo $\theta_{\min}=\theta$ (comumente $\theta_{\min}=-140.0^\circ$) passando a ilustrar no *display* o texto “In Testing // $\theta = \text{ang}^\circ$ ” a cada tempo de aquisição.

Quando disparado o gatilho (c), o martelo inicia seu movimento pendular e o usuário pode observar o ângulo no *display*. O ângulo irá aumentar até acontecer o impacto entre o martelo e o corpo de prova (d) em $\theta=0.0^\circ$ e iniciar seu movimento de subida em que a posição angular é positiva. Durante esta etapa, o sistema estará sempre registrando o maior valor angular através de uma comparação recursiva da forma:

```
if theta>theta_max {theta_max = theta};
```

assim, ao cruzar pelo seu pico mínimo (e), não haverá valor de ângulo maior do que este (no caso do experimento, $\theta_{\max}=97.50^\circ$).

Na segunda vez que o ângulo cruzar pela referência $\theta=0^\circ$ (f), o sistema emite três bips curtos, finaliza o ensaio e passa a realizar os cálculos para ilustrar os resultados no *display*.

Sistema em Calibração

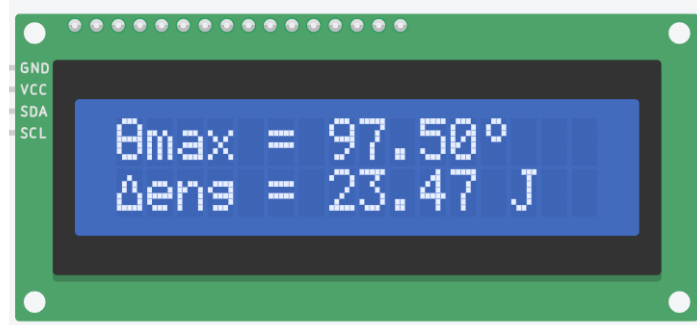
Neste caso, o *display* ilustra o texto “Calibration // $\theta = \text{ang}^\circ$ ”, e o procedimento é o mesmo, porém sem o corpo de prova. Na segunda vez que o ângulo cruzar pela referência $\theta=0^\circ$ (f), o sistema registra em na EEPROM do microcontrolador o valor do ângulo de calibração que será, neste caso, o ângulo máximo alcançado sem o impacto do martelo, ou seja, $\theta_{\text{cal}}=\theta_{\max}$ (no experimento de exemplo, $\theta_{\text{cal}}=108.75^\circ$) na linha pontilhada vermelha da Figura 03. O *display* então ilustra o texto “Calibrated // $\theta_{\text{cal}} = \text{ang}^\circ$ ” e fica aguardando o usuário apertar o botão de controle novamente para entrar em modo de espera.

Cálculo e ilustração dos resultados

A partir do final do estado de ensaio, quando o martelo passa pela segunda vez na posição de fixação do corpo de prova ($\theta=0.0^\circ$), o sistema realiza os procedimentos de cálculo da Equação 03 com os dados armazenados nas variáveis `theta_min`, `theta_max`, e `theta_cal`.

Então, o *display* ilustra os resultados. Como exemplo, considerando os dados coletados no experimento, os resultados são como da Figura 04.

Figura 04 – Ilustração dos resultados do experimento de exemplo



Fonte: os autores.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 148-2**: Materiais metálicos: ensaio de impacto por pêndulo Charpy: Parte 2: Verificação de máquinas de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705p.

CAPELLI, A.. **Automação industrial – Controle do Movimento e Processos Contínuos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Érica, 2013.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 365 p., il. ISBN 9788521620679.



TOMAZINI, D.; ALBURQUE, P. U. B. De, **Sensores Industriais**. 9ª ed. Rio de Janeiro: Érica, 2020.