

METODOLOGIA BÁSICA PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE REFERÊNCIA PARA A CALIBRAÇÃO INDIRETA DE MÁQUINAS PENDULARES DE IMPACTO CHARPY¹

*Ademir Severino Duarte²
Leonardo Barbosa Godefroid³
Luiz Cláudio Cândido⁴*

Resumo

A metodologia básica apresentada neste trabalho tem o objetivo de mostrar e comparar os resultados de ensaios de impacto Charpy realizados em materiais de referência de baixo (<20 J) e alto nível de energia (≤ 136 J) com corpos-de-prova do tipo Charpy confeccionados em aço AISI/SAE 4340. Para realizar os ensaios foram empregadas duas máquinas pendulares industriais com estabilidade estrutural e características geométricas dentro dos limites recomendados por normas técnicas. Os resultados apresentados pelas máquinas no menor nível de energia de impacto (<20 J) impediram a sua classificação como máquinas pendulares de referência. Conseqüentemente, a metodologia proposta deverá ser melhorada após uma investigação técnica dos agentes responsáveis pelas variações obtidas nos resultados dos ensaios.

Palavras-chave: Calibração; Máquina pendular; Impacto Charpy; Materiais de referência.

BASIC METHODOLOGY FOR TO PRODUCE REFERENCE MATERIALS FOR CALIBRATE CHARPY IMPACT MACHINE

Abstract

The basic methodology presented in this work has the objective of to show and to compare the results of impact Charpy tests in low reference materials (<20J) and high level of energy (≤ 136 J) with specimens of AISI/SAE 4340 steel Charpy type. The tests has been done in two industrial machines with structural stability and geometric characteristics described by technical norms. The results presented by the machines in the smallest level of impact energy (<20J) don't allow its classification as reference machines. Consequently, the methodology proposed should be improved after a technical investigation of the responsible agents by the variations obtained in the tests results.

Keywords: Calibration, Impact machine, Charpy test, Reference materials

¹ 62° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 23 a 27 de julho de 2007, Vitória, ES, Brasil.

² Engenheiro mecânico, mestre em engenharia dos materiais (CETEC).

³ Engenheiro metalurgista, doutor e professor da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)-MG.

⁴ Engenheiro metalurgista, doutor e professor da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)-MG.

1 INTRODUÇÃO

O ensaio de impacto Charpy é um dos ensaios mecânicos mais simples e barato para a determinação da tenacidade dos aços e outros materiais metálicos. O ensaio é baseado na medida da energia de impacto absorvida por um corpo-de-prova (CP) prismático, entalhado, bi-apoiado, sujeito a um golpe de um martelo pendular, parte integrante da máquina de impacto.

Uma outra avaliação derivada do ensaio é o aspecto da fratura do corpo-de-prova, que pode ser empregado para a determinação da temperatura de transição dúctil-frágil de um determinado material. Outra avaliação é a medida da expansão lateral verificada na seção transversal do corpo-de-prova impactado.

Segundo Cruz,^[1] no Brasil, os pedidos anuais de calibração de máquinas pendulares de impacto do tipo Charpy giram em torno de 50. A normalização ISO estabelece uma calibração indireta da máquina em pelo menos, dois níveis de energia para cada faixa nominal. No entanto, o INMETRO tem observado que 90% das máquinas pendulares do tipo Charpy existentes no Brasil, apresentam apenas uma faixa nominal.

A ABNT^[2] define MR como um material ou substância que tem um ou mais valores de propriedades que são suficientemente homogêneos e bem estabelecidos para ser usado na calibração de um aparelho, na avaliação de um método ou atribuição de valores a materiais. O material de referência Certificado (MRC) é definido pelo ISO Guia 30 como um material de referência, acompanhado por um certificado, com um ou mais valores de propriedades, e certificado por um procedimento que estabelece sua rastreabilidade à obtenção exata da unidade na qual os valores de propriedade são expressos.

A aquisição de materiais de referência pelos laboratórios objetiva o aumento da confiabilidade dos resultados de ensaios produzidos. No entanto, de um modo geral, os valores certificados num material de referência (MR) somente são representativos e válidos se forem utilizados segundo a metodologia que os certificou.

Os dados aqui apresentados, são parte integrante de experimentos de trabalho de mestrado^[3] desenvolvido para a implantação da metodologia empregada pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) para a produção de materiais de referência para o ensaio de impacto Charpy.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As principais etapas de realização dos experimentos incluíram: (1) a comparação das propriedades mecânicas de dureza do tipo Rockwell e tenacidade entre o aço AISI/SAE 4340 utilizado na confecção dos MRs SRM 2092 e SRM 2096^[4] e as barras também de aço AISI/SAE 4340 utilizado neste trabalho para a confecção de corpos-de-prova do tipo Charpy e, (2) comentários da importância da calibração das máquinas pendulares de impacto do tipo Charpy pelo método indireto.^[5,6]

A escolha do aço AISI/SAE 4340 para a confecção dos CPs para os ensaios de impacto Charpy foi motivada pela necessidade de se estabelecer uma comparação direta com as energias de impacto apresentadas pelos materiais de referência. Os materiais de referência SRM 2092 (baixo nível de energia de impacto, <20J) e SRM 2096 (alto nível de energia de impacto, ≤136J) que foram confeccionados pelo NIST e importados pelo Laboratório Robert Hooke do CETEC, também são feitos de aço AISI/SAE 4340. Estes materiais de referência apresentam principalmente, estabilidade dimensional, homogeneidade microestrutural e valores conhecidos de dureza HRC e resistência ao impacto Charpy.

Para desenvolver o trabalho foram confeccionados corpos-de-prova (CPs) do tipo Charpy, tamanho padrão, tipo A, (Figura 1) em aço AISI/SAE 4340.

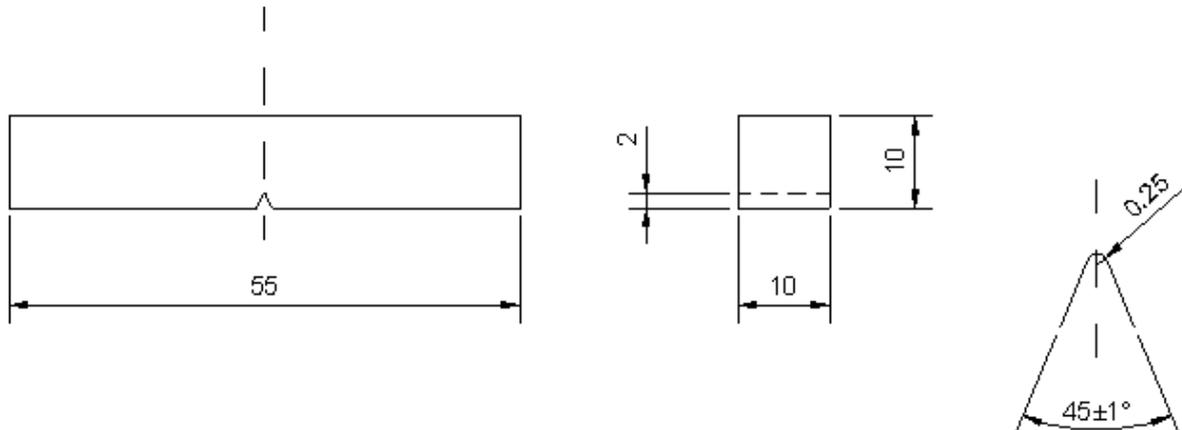


Figura 1. Corpo-de-prova Charpy tamanho padrão.

As temperaturas empregadas para os ensaios de impacto Charpy foram: -80°C , -60°C , -40°C , -20°C , 0°C , $+23^{\circ}\text{C}$, $+50^{\circ}\text{C}$, $+100^{\circ}\text{C}$ e $+150^{\circ}\text{C}$. Para cada nível de temperatura foram utilizados 17 CPs. Nos estudos comparativos com os materiais de referência foram ensaiados 68 CPs na temperatura de -40°C dos 204 CPs selecionados aleatoriamente de uma produção de 270 corpos-de-prova.

Os ensaios foram realizados em dois laboratórios de ensaios mecânicos em materiais: (1) Laboratório Robert Hooke da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC (Laboratório A) e, (2) Laboratório de Ensaios Mecânicos da Comissão de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN (Laboratório B). As Figuras 2 e 3 mostram as fotos das máquinas pendulares de impacto Charpy pertencentes aos laboratórios e utilizadas nos ensaios.

O critério empregado para a definição do número representativo de CPs para caracterizar o lote numa determinada temperatura foi adotado porque o número de laboratórios envolvidos na análise não caracteriza um programa interlaboratorial. A norma ASTM,^[7] recomenda no mínimo seis laboratórios para integrarem um programa interlaboratorial e uma quantidade de 25 corpos-de-prova para caracterizar um nível de energia da máquina pendular de impacto Charpy.



Figura 2 - Máquina pendular de impacto Charpy, DI-300, 406,7 J (Laboratório A).



Figura 3 - Máquina pendular de impacto Charpy, 300 J (Laboratório B).

As medições dimensionais dos corpos-de-prova confeccionados e selecionados foram determinadas com instrumentos compatíveis com a natureza da medição. O desempenho operacional das máquinas pendulares de impacto Charpy dos laboratórios envolvidos nos ensaios foi verificado de acordo com procedimentos normalizados [5,6,8]. Os testes aplicados incluíam: (a) verificação da perda de energia por atrito nos mancais, (b) verificação da perda de energia em 11 ciclos e, (c) verificação do tempo para realizar 100 ciclos. As características geométricas das duas máquinas foram avaliadas pelo Laboratório de Metrologia Dimensional – SENAI-EL (Contagem/MG).

Para a determinação das medidas de expansão lateral e porcentagem do aspecto fibroso apresentado pelos corpos-de-prova rompidos (aço AISI/SAE 4340 e materiais de referência SRM 2092 e SRM 2096) nos ensaios de impacto Charpy, foram feitas no Laboratório de Metalografia do CDTN/CNEN, fotografias das superfícies de fratura.

Para a medição da expansão lateral e da superfície de fratura foram utilizados programas de computador (“Firegraphic” e “Origin”) para análise das imagens.

Para avaliar o grau de dispersão dos dados obtidos, foi empregado além do desvio padrão, a amplitude. Para a especificação de um valor típico da propriedade medida, foi determinada a média dos dados. Nas situações em que verificou-se a possibilidade da existência de diferença entre duas médias de uma propriedade medida, foi empregada a estatística para o teste desta diferença – Testes de hipóteses.

3 RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados da composição química determinada através de espectrometria de emissão ótica (Plasma). O instrumento utilizado nas análises foi um espectrômetro marca ThermoARL, número de série 786, fabricante ARL *Metal Analyzer*, conectado e monitorado a um computador com *software* COFELAST.

Tabela 1. Composição química do aço AISI/SAE 4340 (% em peso)

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo
Composição	0,39	0,65	0,22	0,02	0,009	1,68	0,75	0,23

As Figuras 4 e 5 mostram os materiais de referência e suas embalagens específicas de preservação de suas propriedades.

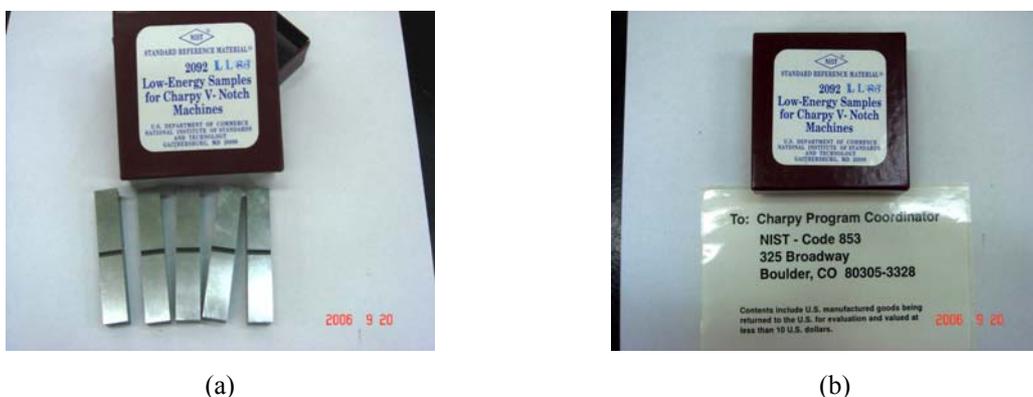


Figura 4. Materiais de referência SRM 2092, baixo nível de energia de impacto; (a) MR fora da embalagem identificada como lote LL 86, (b) Embalagem e endereço do produtor do SRM.



(a)



(b)

Figura 5. Materiais de referência SRM 2096, alto nível de energia de impacto; (a) SRM fora da embalagem identificada como lote HH 85, (b) Identificação do SRM por lote, número e produtor.

A Tabela 2 mostra os valores de dureza determinados para os CPs de aço AISI/SAE 4340 e os materiais de referência.

Tabela 2. Valores de dureza HRc determinados para o aço AISI/SAE 4340, materiais de referência e dureza Brinell (HB) correspondente.

Referência do CP	Tratamento térmico	Dureza (HRc)			Dureza ^(a) (HB)	Medição Laboratório
		Média	Desvio padrão	Amplitude		
T ₈	estado de entrega	44,0	0,82	3,0	475	A
T ₉	estado de entrega	43,3	2,23	7,0	475	B
SRM 2092	estado de entrega	44,5	0,50	1,0	475	A
T ₁₀	recozimento	27,8	0,43	1,5	285	A
T ₁₁	recozimento	29,3	1,05	4,0	293	B
SRM 2096	recozimento	31,9	0,22	0,50	340	A

(a) Os valores apresentados foram obtidos por conversão da unidade de dureza e referem-se ao valor médio da dureza HRc.

A Figura 6 mostra a curva da temperatura de transição dúctil-frágil dos CPs de aço AISI/SAE 4340 baseada nos resultados da expansão lateral obtida em função da temperatura de ensaio.

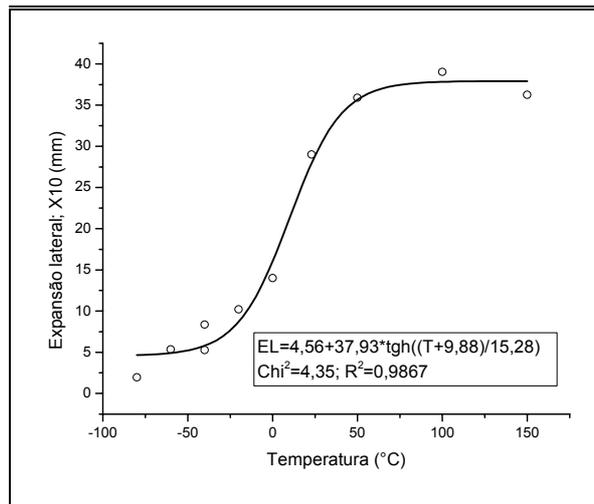


Figura 6 – Gráfico da expansão lateral *versus* temperatura de ensaio, mostrando a curva de transição dúctil-frágil do aço AISI/SAE 4340.

A Tabela 3 apresenta a média dos resultados das energias de impacto Charpy, das expansões laterais e das porcentagens de fraturas determinadas para cada grupo de corpos-de-prova e pelos materiais de referência.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de impacto Charpy.

Temp. de ensaio (°C)	Cod Ref	Energia absorvida - KV (J)			Expansão lateral x 10 (mm)	Superfície fibrosa (%)
		Média	Amplitude	Desvio padrão		
-80	T ₄	11,7	4,9	1,3	1,95	16
-60	T ₃	13,9	7,9	2,5	5,34	21
-40	T ₉	20,0	7,0	3,7	5,27	16
-40	T ₁₀	90,7	10,2	2,1	35,9	47
-40	T ₁₁	89,4	6,1	1,8	38,6	59
-40	T ₈	18,9	13,0	4,3	8,37	16
-20	T ₂	22,2	7,4	2,1	10,2	20
0	T ₁	25,8	10,0	3,3	14,0	25
+23	T	28,2	11,1	3,5	29,0	25
+50	T ₅	32,6	19,3	5,2	35,9	51
+100	T ₆	42,7	27,9	6,6	39,0	52
+150	T ₇	48,8	23,8	7,8	36,3	55
-40	SRM 2092	19,1	5,9	2,4	1,21	20
-40	SRM 2096	91,6	5,5	2,1	3,75	51

4 DISCUSSÃO

Os valores de composição química encontrados são compatíveis com os apresentados no certificado de conformidade do fornecedor do material e estão dentro da faixa de tolerância prevista para a classificação do aço AISI/SAE 4340.

No caso do ensaio de impacto Charpy, existem normas técnicas que prescrevem os procedimentos de calibração da máquina pendular de ensaios. Uma dessas normas,^[1] recomenda a verificação direta e indireta da máquina. Na verificação

direta são determinadas: (a) as características geométricas da máquina (comprimento real do pêndulo, comprimento reduzido do pêndulo, ângulo da cunha do cutelo, distância entre apoios, ângulo de saída dos apoios, etc.); (b) o nivelamento (alinhamento e simetria da fixação do cutelo no martelo, simetria e perpendicularidade do plano de oscilação, paralelismo entre arestas dos encostos e o plano de oscilação, etc.) e, (c) as resistências passivas (perdas de energia por atrito no movimento de translação, folga radial do pêndulo, folga axial do pêndulo, etc.). Na verificação indireta são empregados MRC, que são ensaiados na máquina pendular de impacto e cujo valor da energia absorvida é conhecido.

De acordo com pesquisadores,^[9] algumas das causas de maior efeito nos resultados de energia de impacto Charpy são:

- a) Afrouxamento de componentes montados;
- b) Montagem inadequada do corpo-de-prova na máquina;
- c) Procedimentos de ensaios;
- d) Instalação inadequada da máquina pendular;
- e) Dimensões incorretas dos apoios e cutelos;
- f) Atrito excessivo das partes móveis.

Os resultados da verificação direta da máquina pendular de impacto Charpy evidenciam somente as condições operacionais. Os resultados da verificação direta são muito importantes na montagem e instalação da máquina, substituição de componentes e inspeções periódicas. A verificação indireta permite a descoberta de vários problemas da máquina, como afrouxamento de apoios e repetitividade de desempenho operacional.

O produtor de MR precisa: (a) planejar os processos que diretamente afetam a qualidade da produção. O mecanismo de planejamento deve ser pré-estabelecido, o que pode implicar num trabalho conjunto com especialistas para assegurar que cada estágio do processo seja adequadamente realizado; (b) estabelecer procedimentos de preparação do material, o que inclui: análise qualitativa para verificação do tipo de material e obtenção de amostras representativas.

Os valores de dureza Rockwell medida nos corpos-de-prova do aço AISI/SAE 4340 mostraram dispersões em comparação aos materiais de referência SRM 2092 e SRM 2096 que também são produzidos em aço AISI/SAE 4340 e tratados termicamente.

Pelos resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que os corpos-de-prova T₈ e T₉ (confeccionados da barra de aço AISI/SAE 4340) apresentam dureza mais próxima do material de referência equivalente, SRM 2092. Embora a variação máxima considerando-se o valor médio tenha sido de 1,2HRc, o valor é correspondente a média das faixas de erro dos padrões de dureza empregados na calibração dos durômetros pertencentes aos Laboratórios A e B.

Já os CPs T₁₀ e T₁₁ (confeccionados da barra de aço AISI/SAE 4340 e com tratamento térmico de recozimento) apresentaram valores de dureza mais distantes em comparação ao material de referência equivalente, SRM 2096. Segundo Vigliotti [8] se um lote de materiais de referência destinados a calibração indireta de máquinas de impacto Charpy apresentar valores de dureza com dispersão superior a 0,5HRc, ocorre a recusa do lote no processo de produção de materiais de referência.

Regiões de fratura dúctil foram encontradas em todos os quatro cantos da superfície de fratura dos materiais de referência de alta energia (SRM 2096) e dos CPs confeccionados de aço AISI/SAE 4340 com tratamento térmico. A largura das regiões de fratura dúctil aumentou com o aumento da temperatura de ensaio.

A curva da temperatura de transição dúctil-frágil mostrada na Figura 6, foi obtida através de uma linha de tendência baseada numa equação da tangente hiperbólica.

5 CONCLUSÃO

Pela análise dos testes estatísticos (testes de hipóteses, comparando-se a igualdade entre as médias dos resultados) realizados observou-se que as máquinas pendulares dos Laboratórios A e B apresentaram desempenhos similares nos ensaios de impacto Charpy. No entanto, os valores de tenacidade em termos de energia absorvida, apresentada pelas máquinas pendulares dos dois laboratórios principalmente no menor nível avaliado (<20 J), não se enquadraram dentro dos limites de aceitação. Estudos adicionais devem ser realizados para determinar as causas da “grande dispersão” entre as energias de impacto observadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CETEC, CDTN e Valadares Diesel Siderúrgica Ltda (VDL) pelo uso de seus laboratórios para a realização dos ensaios e análises. A Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT) pelo incentivo para a transformação deste trabalho numa dissertação de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 CRUZ, P. JORGE ANTÔNIO; PEREIRA, F. F. MARISA; LINK, W.; FREITAS LINK, C. C. L.; MARQUES GARCIA, C. A. “Development and Manufacture of Charpy Standard Test Specimens for XVIII IMEKO World Congress”. In: XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, RJ, Brasil, 17 a 22 de setembro de 2006, 2p.
- 2 ABNT ISO GUIA 30, Termos e Definições Relacionados com Materiais de Referência, Primeira Edição, 2000, 7p.
- 3 DUARTE, A. S., Metodologia Básica para a Produção de Materiais de Referência para a Calibração Indireta de Máquinas Pendulares de Impacto Charpy (Dissertação de Mestrado), UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, dezembro de 2006, 102p.
- 4 NIST, Standard Reference Materials, Verification Specimens for Charpy V-Notch Impact Machines, Certificate, Broadway, EUA, agosto de 2000, 3p.
- 5 ASTM E 23-02a, “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”, 2002, 27p.
- 6 ISO/DIS 148-2, Metallic Materials, Charpy Pendulum Impact Test – Part 2:
- 7 ASTM E 691-92, “Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method”, 1992, 20p.
- 8 VIGLIOTTI, D. P., SIEWERT, T. A. E MCCOWAN, C. N., “Installing, Maintaining and Verifying Your Charpy Impact Machine”. Practice Guide, special publication 960-4, NIST, 2000, 17p.
- 9 SIEWERT, T. A.; MANAHAN, M. P.; MCCOWAN, C. N.; HOLT, J. M.; MARSH, F. J., E RUTH, E. A., “The history and importance of Impact Testing, Pendulum Impact Testing: A Century of Progress”, ASTM STP 1380, Pennsylvania, 1999, 16p.
- 10 Verification of Testing Machines, 2006, 23p.