

unesp 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**CHARPY INSTRUMENTADO - DETERMINAÇÃO
DA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA DE
MATERIAIS METÁLICOS**

Alessandro Roger Rodrigues

Ilha Solteira - SP

1210001221



unesp 

unesp 

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**CHARPY INSTRUMENTADO - DETERMINAÇÃO
DA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA DE
MATERIAIS METÁLICOS**

Ilha Solteira

BCpIS - FEIS - UNESP



CHARPY INSTRUMENTADO - DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA DE MATERIAIS METÁLICOS

Alessandro Roger Rodrigues

1210001221



Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Orientador: PROF. DR. RUÍS CAMARGO TOKIMATSU

Co-orientador: PROF. DR. ADYLES ARATO JÚNIOR

30505003 Processos de Fabricação

Ilha Solteira, Abril de 2001

“Charpy Instrumentado - Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica de Materiais Metálicos”

ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE


MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr. André Luiz Seixlack – Coordenador

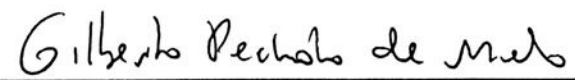
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ruis Camargo Tokimatsu - Orientador



Prof. Dr. Itamar Ferreira



Prof. Dr. Gilberto Pechoto de Melo

Ilha Solteira – SP, abril de 2001

BCpIS - FEIS - UNESP

a Deus

ao meu pai Omir, minha mãe Mathilde e meu irmão Roger

à minha noiva Ana Paula

aos meus amigos



Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto e Prof^a. MSc. Edmar Maria Lima Lopes, com os quais pude crescer durante os cursos de graduação e pós graduação.

Ao Sr. José Lourival Pereira, Técnico do Laboratório de Instrumentação da Companhia Energética do Estado de São Paulo - CESP - pelo trabalho na preparação da célula de carga.

Ao Sr. Jair Gomes da Silva, Diretor Técnico da Engel - Indústria e Comércio de Instrumentos Ltda, pela boa vontade nas incansáveis explicações sobre o medidor de deformação e deslocamento modelo TMDE.

Ao Sr. Euler Barreto Júnior pelas explicações sobre extensômetros elétricos de resistência empregados em células de carga.

Ao Sr. Franquiley Leão Pinto, funcionário do Laboratório de Instrumentação da CESP, e Sr. Josevaldo Godoy da Silva, doutorando em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, pelo auxílio na colagem dos extensômetros.

Aos Técnicos e Funcionários dos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica, Sr. Marino Teixeira Caetano, Sr. Darci Alves Ribeiro, Sr. Ronaldo Máscoli, Sr. Edvaldo Silva de Araújo, Sr. Reginaldo Cordeiro da Silva e Sr. Carlos José Santana pelo incontestável apoio na execução de corpos de prova, projeto e preparação de dispositivos afins.

Aos Técnicos dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil, Sr. Gilberto Antônio de Brito, Sr. Mário Roberto Correa Ferreira, Sr. Gilson Campos Correa e Sr. Silvio Rogério Sanitá Moreira, pela fundamental colaboração e acompanhamento na utilização dos equipamentos e máquinas de ensaio.

Ao Técnico do Laboratório de Eletrônica do Departamento de Engenharia Elétrica, Sr. Everaldo Leandro de Moraes, e ao Prof. Dr. José Carlos Rossi, do mesmo departamento, por viabilizar a utilização de laboratórios e instrumentos eletrônicos de medida.

Ao Sr. Elias Amaral dos Santos, Técnico em Informática, pelo contínuo suporte em software e hardware.

Às secretárias do Departamento de Engenharia Mecânica, Sra. Vânia Maria Xavier e Sra. Sandra Lúcia Maciel Pereira pelo auxílio nas inúmeras questões administrativas.

A todos os funcionários do Serviço de Biblioteca e Documentação da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, em especial ao bibliotecário João Josué Barbosa pela orientação e constante acompanhamento da redação dos capítulos Revisão Bibliográfica e Referências Bibliográficas.



Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu pela orientação geral do trabalho, pelos valiosos ensinamentos e companheirismo constante.

Ao Prof. Dr. Adyles Arato Júnior pelo preciso acompanhamento na implementação do sistema de medida empregado na máquina Charpy.

Ao Prof. Dr. Itamar Ferreira, do Departamento de Engenharia de Materiais da UNICAMP, pelos preciosos comentários e esclarecimentos sobre o trabalho.

Ao Prof. Dr. José Luis Gasche, Prof. Dr. Antônio de Pádua Lima Filho e Prof. Edison Righeto pela rica orientação acerca da metodologia e tratamento estatístico dos resultados experimentais.

Ao Prof. Dr. Miguel Ângelo Menezes por esclarecimentos de teorias e aconselhamentos na parte escrita do trabalho.

Ao Prof. Dr. João Batista Aparecido pelo apoio na implementação computacional da rotina "Charpy Instrumentado".

Ao Prof. Dr. Edson Del Rio Vieira pelas repetidas e minuciosas documentações, via processo fotográfico, de peças e dispositivos utilizados nos ensaios.

Ao Prof. MSc. Daniel Yvan Martin Delforge e Prof. MSc. Celso Ryiotsi Sokei pelo acompanhamento dos testes laboratoriais e explicações sobre o assunto.

Ao Prof. Dr. João Antônio Pereira, Prof. Dr. Luiz de Paula do Nascimento, Prof. Dr. Gilberto Pechoto de Melo e Prof. MSc Antônio Eduardo Turra pelas contribuições na análise dos sinais medidos.

Ao Prof. MSc. Juno Gallego pelas medidas de energia Charpy global realizadas na Universidade Federal de São Carlos - UFScar.

Ao Prof. Dr. Dirceu Spinelli pelas medidas de energia efetuadas na máquina de ensaio Charpy instrumentado da Escola de Engenharia de São Carlos - USP.

Ao Prof. Dr. José Marcos Lopes, do Departamento de Matemática, pelo companheirismo e pelos valiosos ensinamentos transmitidos durante o curso de graduação, os quais tornaram-se essenciais para a realização deste trabalho.

Aos demais docentes da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, em especial ao Prof. Dr. Emanuel Rocha Woiski, Prof. Dr. Sérgio Said Mansur, Prof. Dr. André Luiz Seixlack,

Prof. Dr. Hidekasu Matsumoto e Prof^a. MSc. Edmar Maria Lima Lopes, com os quais pude crescer durante os cursos de graduação e pós graduação.

Ao Sr. José Lourival Pereira, Técnico do Laboratório de Instrumentação da Companhia Energética do Estado de São Paulo - CESP - pelo trabalho na preparação da célula de carga.

Ao Sr. Jair Gomes da Silva, Diretor Técnico da Engel - Indústria e Comércio de Instrumentos Ltda, pela boa vontade nas incansáveis explicações sobre o medidor de deformação e deslocamento modelo TMDE.

Ao Sr. Euler Barreto Júnior pelas explicações sobre extensômetros elétricos de resistência empregados em células de carga.

Ao Sr. Franquiley Leão Pinto, funcionário do Laboratório de Instrumentação da CESP, e Sr. Josevaldo Godoy da Silva, doutorando em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, pelo auxílio na colagem dos extensômetros.

Aos Técnicos e Funcionários dos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica, Sr. Marino Teixeira Caetano, Sr. Darci Alves Ribeiro, Sr. Ronaldo Máscoli, Sr. Edvaldo Silva de Araújo, Sr. Reginaldo Cordeiro da Silva e Sr. Carlos José Santana pelo incontestável apoio na execução de corpos de prova, projeto e preparação de dispositivos afins.

Aos Técnicos dos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil, Sr. Gilberto Antônio de Brito, Sr. Mário Roberto Correa Ferreira, Sr. Gilson Campos Correa e Sr. Silvio Rogério Sanitá Moreira, pela fundamental colaboração e acompanhamento na utilização dos equipamentos e máquinas de ensaio.

Ao Técnico do Laboratório de Eletrônica do Departamento de Engenharia Elétrica, Sr. Everaldo Leandro de Moraes, e ao Prof. Dr. José Carlos Rossi, do mesmo departamento, por viabilizar a utilização de laboratórios e instrumentos eletrônicos de medida.

Ao Sr. Elias Amaral dos Santos, Técnico em Informática, pelo contínuo suporte em software e hardware.

Às secretárias do Departamento de Engenharia Mecânica, Sra. Vânia Maria Xavier e Sra. Sandra Lúcia Maciel Pereira pelo auxílio nas inúmeras questões administrativas.

A todos os funcionários do Serviço de Biblioteca e Documentação da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, em especial ao bibliotecário João Josué Barbosa pela orientação e constante acompanhamento da redação dos capítulos Revisão Bibliográfica e Referências Bibliográficas.

Aos amigos e companheiros de orientação acadêmica Otavio Villar da Silva Neto e Ana Carolina Franco pelas diversas discussões e contribuições em artigos científicos, relatórios científicos e documentos afins.

A todos os companheiros do curso de pós graduação em Engenharia Mecânica, especialmente ao Tito Dias Júnior, Cláudio Lindquist, Silmara Cassola, Marcos Rogério Barbazelli, Odenir de Almeida, Demian Gomes da Silva, Adriano Silva Borges, Daniela Demarchi, Edgard Poiate Júnior, Paulo Eduardo Lopes Barbieri, Carla Nagata, Herbert Carlos Gonçalves, Keli Cristina Maciel Dias, Ricardo Kasuo Itikava e Valéria Di Giunta pelo apoio e companheirismo constante.

Aos colegas do curso de graduação, Antônio Roberto Scudeller Filho e Eduardo Leira Kruger pelo auxílio durante a realização dos ensaios.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP - pela concessão da bolsa de estudos e pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À Pró Reitoria de Pós Graduação e Pesquisa da UNESP - PROPP - pelo auxílio financeiro nas participações em eventos científicos.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP pela utilização dos laboratórios, viabilização do trabalho de pesquisa e realização dos cursos de graduação e mestrado.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos-USP pela utilização do Laboratório de Ensaios Mecânicos.



Lista de Tabelas	xv
Lista de Ilustrações	xvii
Lista de Símbolos.....	xix
Resumo.....	xxv
Abstract	xxvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 FRATURA NOS MATERIAIS METÁLICOS.....	1
1.2 ESCOPO E ESTRUTURA DO TRABALHO	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 ENSAIOS MECÂNICOS	10
2.3 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY E IZOD.....	12
2.4 SISTEMAS DE MEDIDA E INSTRUMENTAÇÃO	16
2.4.1 Tipos de Sinais	18
2.4.2 Comportamento dos Sistemas de Medida	22
2.4.3 Transdutores e Sensores.....	25
2.5 ENSAIO CHARPY INSTRUMENTADO.....	29
2.5.1 Condições para Instrumentação do Ensaio.....	31
2.5.2 Especificação e Calibração do Sistema de Medida segundo a ASM	33
2.5.3 Especificação e Calibração do Sistema de Medida segundo a ISO.....	37
2.5.4 Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica.....	40
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 MATERIAIS.....	43
3.2 METODOLOGIA - ETAPA 1	45
3.2.1 Descrição da Instalação Experimental.....	45
3.2.2 Especificação dos Equipamentos.....	47



3.2.3 Curva de Resposta do Condicionador de Sinais	49
3.2.4 Instrumentação do Martelo Pendular	50
3.2.5 Avaliação da Qualidade da Colagem dos Extensômetros	51
3.2.6 Calibração Estática da Célula de Carga.....	54
3.2.7 Ensaio de Flexão Monotônico em Três Pontos.....	56
3.3 METODOLOGIA - ETAPA 2	57
3.3.1 Descrição da Instalação Experimental	58
3.3.2 Especificação dos Equipamentos	59
3.3.3 Instrumentação da Base de Apoio dos Corpos de Prova	60
3.3.4 Avaliação da Qualidade dos Sinais.....	61
3.3.5 Curva de Resposta do Medidor de Deformação.....	63
3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	64
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.....	69
4.1 DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS - ETAPA 1	69
4.1.1 Influência da Velocidade de Impacto.....	70
4.1.2 Influência da Variação Microestrutural dos Materiais.....	71
4.2 DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS - ETAPA 2	74
4.3 PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA TRATAMENTO DOS RESULTADOS	79
CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO	83
5.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE IMPACTO	83
5.2 INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS MATERIAIS.....	84
5.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIDA UTILIZADO NA ETAPA 1	85
5.4 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIDA UTILIZADO NA ETAPA 2	86
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	91
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A - FOTOGRAFIAS.....	103
APÊNDICE B - ESTRUTURA COMPUTACIONAL	105
APÊNDICE C - ANÁLISE DAS INCERTEZAS	107



Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Caracterização mecânica dos materiais ensaiados na etapa 1.....	44
Tabela 3.2 - Caracterização mecânica dos materiais ensaiados na etapa 2.....	45
Tabela 3.3 - Equipamentos utilizados na etapa 1 do trabalho.	48
Tabela 3.4 - Ensaio para avaliar a qualidade da colagem dos extensômetros.....	53
Tabela 3.5 - Resultados da calibração estática da célula de carga.	55
Tabela 3.6 - Equipamentos utilizados na etapa 2 do trabalho.	59
Tabela 4.1 - Velocidades de impacto adotadas.....	69
Tabela 4.2 - Forças máximas medidas dinâmica e monotonicamente [kN].	73
Tabela 4.3 - Valores de tenacidade à fratura aparente [MPa.m ^{1/2}]	73
Tabela 4.4 - Energias medidas e calculadas [J].....	78
Tabela 4.5 - Forças máximas medidas dinâmica e monotonicamente [kN].	79
Tabela 4.6 - Valores de tenacidade à fratura aparente [MPa.m ^{1/2}].	79
Tabela C.1 - Resultados finais de dureza.....	113
Tabela C.2 - Resultados finais de ductilidade.	114
Tabela C.3 - Resultados finais do limite de resistência à tração.	115
Tabela C.4 - Resultados finais de tenacidade.....	116
Tabela C.5 - Resultados finais da força máxima medida no ensaio de flexão monotônico.	117
Tabela C.6 - Resultados finais de K _{Ida} obtidos na etapa 1.	118
Tabela C.7 - Resultados finais de K _{Ida} obtidos na etapa 2.	119
Tabela C.8 - Resultados finais de K _{Ica} obtidos nas etapas 1 e 2.....	119



Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Aspectos dinâmicos dos ensaios mecânicos.....	12
Figura 2.2 - Resultado típico do ensaio Charpy clássico para dois materiais distintos A e B.	13
Figura 2.3 - Corpo de prova Charpy normalizado pela ASTM E-23.....	14
Figura 2.4 - Efeito da temperatura na tenacidade.	15
Figura 2.5 - Sistema geral de medição.	16
Figura 2.6 - Classificação dos sinais.....	18
Figura 2.7 - Sinal analógico associado ao movimento do ponteiro de um relógio.	19
Figura 2.8 - Representação de um sinal digital.	19
Figura 2.9 - Exemplos de sinais dinâmicos.	20
Figura 2.10 - Exemplos de modelagens de sinais impulsivos.	21
Figura 2.11 - Sinal de impacto ideal e real.	22
Figura 2.12 - Modelo matemático geral de um sistema de medida.....	23
Figura 2.13 - Razão de amplitude para um sistema de medida de primeira ordem.....	24
Figura 2.14 - Deformação de um cristal piezoelétrico devido à pressão aplicada.	28
Figura 2.15 - Resposta força vs tempo para um aço de média resistência mecânica.	30
Figura 2.16 - Comparação entre o sinal medido e o sinal esperado.....	33
Figura 2.17 - Posicionamento do corpo de prova Charpy na base de apoio da máquina.....	34
Figura 2.18 - Controle da amplitude das oscilações inerciais pela velocidade de impacto V_0	35
Figura 2.19 - Curvas características força vs deslocamento classificadas pela norma ISO.	39
Figura 3.1 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 1 do trabalho.....	46
Figura 3.2 - Montagem experimental empregada na etapa 1 do trabalho.	46
Figura 3.3 - Curva de resposta do medidor de deformação e deslocamento modelo TMDE.....	49
Figura 3.4 - Martelo pendular instrumentado.	51
Figura 3.5 - Avaliação da qualidade da colagem dos extensômetros.....	52
Figura 3.6 - Curva média do ensaio de avaliação da colagem dos extensômetros.....	54
Figura 3.7 - Curva média do ensaio de calibração estática da célula de carga.	56
Figura 3.8 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 2 do trabalho.....	58
Figura 3.9 - Montagem experimental empregada na etapa 2 do trabalho.	59
Figura 3.10 - Sinais para o aço 8640 medidos simultaneamente.	61
Figura 3.11 - Sinais para o alumínio 7050 medidos simultaneamente.....	62



Figura 3.12 - Curvas de calibração dos transdutores nº 3663 e 3672.	62
Figura 3.13 - Curva de resposta do medidor de deformação e deslocamento após o ajuste.....	63
Figura 4.1 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 1020.....	70
Figura 4.2 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 1040.....	70
Figura 4.3 - Curvas força vs tempo para o aço 300M.	71
Figura 4.4 - Curvas força vs tempo para diferentes materiais. $V_0 = 5,48$ m/s.	71
Figura 4.5 - Curvas força vs tempo para diferentes materiais. $V_0 = 5,24$ m/s.	72
Figura 4.6 - Curvas força vs tempo para diferentes materiais. $V_0 = 4,45$ m/s.	72
Figura 4.7 - Tenacidade à fratura dinâmica aparente em função da velocidade de impacto.	73
Figura 4.8 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 1040.....	75
Figura 4.9 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 8640.....	75
Figura 4.10 - Curvas força vs tempo para o aço 300M.	75
Figura 4.11 - Curvas força vs tempo para o alumínio 7050.	76
Figura 4.12 - Curvas força vs deslocamento para o aço SAE 1040.	76
Figura 4.13 - Curvas força vs deslocamento para o aço SAE 8640.	76
Figura 4.14 - Curvas força vs deslocamento para o aço 300M.	77
Figura 4.15 - Curvas força vs deslocamento para o alumínio 7050.....	77
Figura 4.16 - Curvas força vs tempo e força vs deslocamento para o aço SAE 8640.	77
Figura 4.17 - Curvas força vs tempo e força vs deslocamento para o aço 300M.....	78
Figura 4.18 - Curvas força vs tempo e força vs deslocamento para o alumínio 7050.....	78
Figura 4.19 - Tela de apresentação do programa computacional Charpy Instrumentado.....	80
Figura 4.20 - Opções de cálculo.....	80
Figura 4.21 - Principais resultados obtidos das curvas força vs tempo.....	81
Figura 4.22 - Exemplar de uma curva força vs deslocamento.....	81
Figura A.1 - Dispositivo de compressão dos extensômetros elétricos de resistência.	103
Figura A.2 - Nova base de apoio dos corpos de prova.....	103
Figura A.3 - Detalhe da montagem dos transdutores piezoelétricos na estrutura da máquina....	104
Figura A.4 - Exemplar de um corpo de prova de alumínio 7050 fraturado.....	104
Figura A.5 - Exemplar de um corpo de prova de aço SAE 1040 fraturado.....	104
Figura B.1 - Estrutura geral da rotina computacional Charpy Instrumentado.	105



Lista de Símbolos

LETRAS ROMANAS MAÍUSCULAS

A	amplitude genérica de um sinal
A_p	área de aplicação da força no transdutor piezoelétrico [m^2]
B	espessura do corpo de prova Charpy [mm]
C_{ND}	compliância (flexibilidade) adimensional do corpo de prova Charpy
C_s	compliância (flexibilidade) do corpo de prova Charpy [$m.N^{-1}$]
C_T	compliância (flexibilidade) total do sistema [$m.N^{-1}$]
D_f	diâmetro final [mm]
D_i	diâmetro inicial [mm]
E	módulo de elasticidade longitudinal [$N.m^{-2}$]
E_a	energia total considerando a velocidade constante [J]
E_{al}	erro aleatório
E_m	erro de medição
E_M	energia calculada pela curva força vs tempo corrigida até a força máxima [J]
E_p	energia de propagação da trinca [J]
E_s	erro sistemático
E_T	energia total de fratura [J]
E_0	energia inicial do martelo pendular [J]
F	força genérica medida no ensaio Charpy instrumentado segundo a ISO [N]
F_a	força relativa ao final da propagação instável da trinca segundo a ISO [N]
F_{gy}	força relativa ao escoamento generalizado segundo a ISO [N]
$F_{fmáx}$	força máxima medida no ensaio de flexão [kgf]
F_{iu}	força relativa ao início da propagação instável da trinca segundo a ISO [N]
F_m	força máxima segundo a ISO [N]



$F_{\text{tmáx}}$	força máxima medida no ensaio de tração [kgf]
HRC	dureza Rockwell [HRC]
HV	dureza Vickers [HV]
IE	incremento de escala de um sistema de medição
IR	incerteza do resultado de medição
$IR(X_i)$	incerteza do resultado da i -ésima grandeza
IR_{prov}	incerteza provável do resultado final
ISM	incerteza do sistema de medida
J_{Id}	tenacidade à fratura em condições elasto-plásticas sob carregamento de impacto [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
K	sensibilidade à deformação do extensômetro elétrico de resistência
\dot{K}	taxa de intensidade de tensões [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}\text{ s}^{-1}$]
K_s	ganho permanente do sistema
K_{Ica}	tenacidade à fratura aparente sob carregamento monotônico [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
K_{Ida}	tenacidade à fratura aparente sob carregamento de impacto [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
K_{Id}	tenacidade à fratura em condições de deformação plana sob carregamento de impacto [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
K_{Jd}	tenacidade à fratura em condições elasto-plásticas sob carregamento de impacto, baseado no parâmetro J_{Id} [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
L	comprimento da diagonal da impressão na dureza Vickers [mm]
M	medida genérica obtida por um sistema de medição
$M(\omega)$	razão de amplitude
M_i	i -ésima medida de um conjunto de medidas
N	número de amostras ou medidas
P	força genérica medida no ensaio Charpy instrumentado segundo a ASTM [N]
P_A	força relativa ao final da propagação instável da trinca segundo a ASTM [N]

P_F	força relativa ao início da propagação instável da trinca segundo a ASTM [N]
P_{GY}	força relativa ao escoamento generalizado segundo a ASTM [N]
P_i	amplitude genérica das oscilações inerciais
P_M	força máxima segundo a ASTM [N]
Q	carga aplicada na medida da dureza Vickers [kgf]
R	resistência elétrica [Ω]
R_f	resultado final de uma medição que utiliza expressão de recorrência
RM	resultado da medição
R^2	coeficiente de correlação linear
S	vão da base de apoio dos corpos de prova Charpy [mm]
S_a	desvio padrão
S_0	velocidade do som no corpo de prova Charpy [$m.s^{-1}$]
T	tempo genérico de duração de um impacto modelado [s]
T_R	tempo de resposta experimental de um sistema de medida [s]
V	tensão [V]
V_0	velocidade inicial de impacto [$m.s^{-1}$]
X_i	i-ésima grandeza medida
Z_c	impedância acústica do material que constitui o corpo de prova Charpy [$kg.m^{-2}.s^{-1}$]
Z_m	impedância acústica do material que constitui o martelo pendular [$kg.m^{-2}.s^{-1}$]
W	largura do corpo de prova Charpy [mm]
W_M	energia calculada pela curva força vs tempo até a força máxima segundo a ASTM [J]



LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a	profundidade da trinca ou entalhe Charpy [mm]
b	profundidade de ligamento remanescente na direção da trinca ou entalhe Charpy [mm]
b(t)	amplitude do sinal de entrada [V]
d _r	deslocamento linear do anel dinamométrico [mm]
f _{0,915}	freqüência de um sinal senoidal com atenuação de 10% [Hz]
h	espessura do transdutor piezoelétrico [m]
m	massa do martelo pendular Charpy [kg]
p	pressão aplicada no transdutor piezoelétrico [N.m ⁻²]
r	raio da raiz do entalhe Charpy-V [mm]
s _a	deslocamento relativo ao final da propagação instável da trinca segundo a ISO [mm]
s _{gy}	deslocamento até a força de escoamento generalizado segundo a ISO [mm]
s _{iu}	deslocamento relativo ao início da propagação instável da trinca segundo a ISO [mm]
s _m	deslocamento até a força máxima segundo a ISO [mm]
s	deslocamento do martelo pendular segundo a norma ISO [mm]
t	tempo [s]
t _{GY}	tempo relativo ao escoamento generalizado segundo a ASTM [s]
t _i	tempo instantâneo [s]
t _M	tempo relativo à força máxima segundo a ASTM [s]
t _{N-1}	fator <i>t-student</i> para N-1 graus de liberdade
t ₀	tempo do início do sinal de impacto Charpy [s]
v(t)	velocidade do martelo pendular segundo a norma ISO [m.s ⁻¹]
v ₀	tensão de saída de um transdutor piezoelétrico [V]
y(t)	sinal de saída de um sistema de medida genérico [V]



LETRAS GREGAS

$\delta(\omega)$	erro dinâmico
φ	ductilidade
π	constante 3,1416
σ_t	limite de resistência à tração [N.m ⁻²]
ΔE	energia Charpy considerando a correção de Augland [J]
Δh	deslocamento sofrido pelos eletrodos de um transdutor piezoelétrico [m]
$\Delta M_{\text{máx}}$	máxima diferença entre a média de n medidas e a i-ésima medida
$\Delta R/R$	variação relativa de resistência elétrica
τ	período das oscilações inerciais [s]
τ_s	tempo de resposta analítico de um sistema de medida [s]
ω	freqüência do sinal de entrada [rad.s ⁻¹]

OPERADORES MATEMÁTICOS

$\bar{\quad}$	média de n medidas de uma grandeza
∂	derivada parcial



RODRIGUES, A. R. **Charpy Instrumentado - Determinação da tenacidade à fratura dinâmica de materiais metálicos**. Ilha Solteira, 2001. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

O presente trabalho propõe a instrumentação de uma máquina de ensaio Charpy convencional. Duas etapas distintas foram consideradas no processo de instrumentação. Os testes, conduzidos na 1ª etapa, foram baseados em princípios de extensometria. Uma ponte de *Wheatstone* foi devidamente montada na superfície interna de um furo localizado no martelo pendular, próximo à região de impacto com os corpos de prova. O sistema de medida completo compreendeu, além do martelo pendular como transdutor de força, o indicador de deformação e deslocamento modelo TMDE, como condicionador e amplificador de sinais, o osciloscópio de memória e o microcomputador para tratamento matemático dos resultados. Nesta etapa, duas variáveis estudadas proporcionaram a avaliação do sistema de medida: a influência da velocidade de impacto e da variação microestrutural dos corpos de prova na aquisição dos sinais. A tentativa de inovação e aprimoramento constituiu-se na 2ª etapa. Ao invés da aplicação de extensômetros no martelo pendular apenas, empregou-se também transdutores piezoelétricos dinâmicos posicionados na base de apoio dos corpos de prova. Utilizou-se, em acordo com esses transdutores, condicionadores de sinais com frequência de resposta de 100kHz. A arquitetura de medida em todas as etapas do trabalho foi comparada e avaliada. Os ensaios executados na 1ª etapa mostraram que o sistema de medida adotado limita-se a pequenas taxas de carregamento e a materiais dúcteis. O pequeno tempo de resposta do indicador de deformação e deslocamento sugere ser a principal fonte de limitação do sistema. Os sinais medidos não mostraram de forma eficiente o comportamento da força ao longo do tempo de impacto, tampouco valores corretos de força máxima. Em condições padrões de ensaio, com velocidade de impacto de 5,48 m/s, o aço SAE 1020 apresentou força máxima de 4,5 kN, enquanto os aços SAE 1040 e 300M apresentaram, respectivamente, 0,4 kN e 0,5 kN. Comparando esses resultados aos valores de referência obtidos do ensaio de flexão monotônico em três pontos, foi possível observar uma



acentuada diferença de amplitudes, sobretudo para os casos dos materiais mais frágeis. Por outro lado, o sistema de medida empregado na 2ª etapa, baseado no princípio piezoelétrico de medida, proporcionou resultados mais confiáveis. Embora tenha sido aplicado, paralelamente ao sistema piezoelétrico, o indicador de deformação e deslocamento modificado para operar em uma frequência de resposta maior, em comparação à 1ª etapa de trabalho, ainda observou-se que as curvas de força oriundas desse sistema não permitiram uma classificação clara desses sinais em relação à norma ISO 14.556. No entanto, houve melhora significativa dos resultados de força máxima, alcançando valores da ordem de 8,6 kN para o aço SAE 1040 e 19,8 kN para o aço 300M. Contudo, os resultados mais animadores foram obtidos pelos transdutores piezoelétricos. Os valores de força máxima e energia Charpy apresentaram melhor concordância com os resultados do ensaio de flexão monotônico e também com aqueles obtidos na máquina de ensaio Charpy instrumentado Instron Wolpert. Dessa forma, foi possível medir amplitudes de força máxima em torno de 9,7 kN para a liga de alumínio 7050 e de 21,1 kN para o aço 8640.

Palavras-chave: tenacidade à fratura dinâmica, ensaio Charpy instrumentado.



Abstract

RODRIGUES, A. R. **Instrumented Charpy impact test - Determination of dynamic fracture toughness of metallic materials**. Ilha Solteira, 2001. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

This work proposes an instrumentation of conventional Charpy test machine. Two stages were considered in the instrumentation process. Tests, accomplished in first stage, were based on extensometry principles. A Wheatstone bridge was properly set up in the internal surface of a hole in the striker, closed to the impact area with specimens. The complete measurement system was composed, besides the striker as force transducer, by a strain indicator device as signals amplifier and conditioner, a real time oscilloscope and a computer for mathematical treatment of results. At this stage, the signal acquisition system was tested by varying two variables: loading rate and microstructural variation of specimens. As the first attempt had some drawbacks it was tried a second stage in order to improve the signal acquisition system. Instead of using just the striker instrumented with strain-gages also it was used dynamic piezoelectric transducers placed in anvil. It was applied signal conditioners of 100kHz response frequency to fulfill the needs of these dynamic transducers. The two measurement systems accomplished in the two stages was compared and evaluated. The tests performed at the first stage showed that the measurement system works well just for low loading rates and ductile materials. The low response time of the signal conditioner suggests being the main source of the system limitation. The measured signals did not show the expected force behavior along the impact time as well for the maximum force. In standard test conditions, with impact speed of 5,48 m/s, the SAE 1020 steel presented maximum force of 4,5 kN, while the SAE 1040 and 300M steels presented, 0,4 kN and 0,5 kN, respectively. Comparing these results to the benchmark results obtained from the so called Three Points Quasi Static Bend test, it was possible to observe an accentuated difference of amplitudes, mainly for the more fragile materials. On the other hand, the measurement system used in second stage, based on piezoelectric principles, provided more reliable results. Although it has been applied, parallelly to piezoelectric system, the strain indicator device, modified to operate in a larger



response frequency, in comparison to first stage, it was still observed that the force curves originated from this system did not allow a clear classification of these signals in relation to the ISO 14.556 norm. However, there was significant improvement on results of the maximum force, reaching values of 8,6 kN for the SAE 1040 steel and 19,8 kN for the 300M steel. However, the piezoelectric transducers obtained the most confident results. The maximum force values and Charpy-energy presented better agreement with Quasi Static Bend test results and also with those obtained in the instrumented Charpy test machine Instron Wolpert. In that way, it was possible to measure amplitudes of maximum force around 9,7 kN for the 7050 aluminum and 21,1 kN for the 8640 steel.

Keywords: dynamic fracture toughness, instrumented Charpy impact test.



Introdução

1.1 Fratura nos Materiais Metálicos

Os casos de falhas mecânicas, muitas delas consideradas graves, sempre estiveram presentes na história. Representam um problema sério nos projetos de engenharia em geral. Segundo Madayag, citado por Tokimatsu (1995), as falhas podem ser causadas pelos seguintes fatores, que agem em conjunto ou separadamente:

- ✓ deficiências de projetos
- ✓ seleções inadequadas dos materiais
- ✓ imperfeições nos materiais
- ✓ deficiências nos processamentos
- ✓ erros de montagem
- ✓ condições impróprias de operação
- ✓ manutenções e inspeções inadequadas
- ✓ ações agressivas do meio

Uma das considerações fundamentais no projeto de qualquer componente mecânico ou estrutura é que a resistência deve ser suficientemente maior que a tensão aplicada, para proporcionar segurança e evitar a falência do material. Nestas condições, deve-se conhecer os valores limites suportados pelo material sem que ocorra falha mecânica. Deste modo, será possível relacionar tensões e propriedades mecânicas do material para se projetar com maior confiabilidade. A falha pode ocorrer devido a um ou mais mecanismos de dano. Existem quatro maneiras genéricas pelas quais um componente mecânico pode deixar de cumprir as funções para as quais foi projetado (Powell, 1995):

- ✓ dano superficial
- ✓ deformação elástica excessiva
- ✓ deformação plástica
- ✓ fratura



Ainda que, evidentemente, qualquer tipo de falha seja indesejável, independentemente da sua origem, a fratura é o problema mais inquietante. As falhas estruturais decorrentes de fraturas têm provocado substanciais perdas materiais, paralisação de serviços essenciais e, muitas vezes, perdas de vidas humanas.

De maneira simplista, um componente fratura porque as tensões aplicadas excedem a resistência do material. A fratura é o resultado final do processo de deformação plástica. A tenacidade de um dado material é uma medida da energia absorvida antes e durante o processo de fratura. Assim, a tenacidade indica a quantidade de trabalho que pode ser realizado sobre o material até causar a sua fratura.

Pode-se prever o comportamento mecânico de um componente através de suas propriedades medidas em ensaios. Os ensaios devem ser realizados em amostras sob as mesmas condições de processamento da peça e sob as mesmas condições de serviço, porque o comportamento mecânico não depende somente de condições intrínsecas ao material, depende também de fatores externos. O tipo de solicitação, a taxa de deformação e a ação do meio são exemplos de fatores que influem na resposta dos materiais sob ação de forças. Por esta razão, existe uma grande variedade de ensaios que possibilitam avaliar o comportamento à fratura dos materiais, sob diferentes condições de carregamento.

A tenacidade pode ser medida por diferentes ensaios, sob diferentes taxas de deformação. Dentre os ensaios tidos como convencionais, a tenacidade é mais comumente medida sob altas taxas de deformação, como num ensaio de impacto. Ainda que corpos de prova lisos possam ser utilizados para medir a tenacidade, normalmente os ensaios são realizados em corpos de prova entalhados ou pré-trincados, pois a medida de tenacidade mais comumente aceita está correlacionada com a resistência que o material oferece na presença de uma trinca ou entalhe. A fratura geralmente ocorre em uma região onde a deformação localizada é muito alta.

O século XIX representou um período de mudanças significativas do ponto de vista tecnológico. O baixo nível de conhecimento na época aliado ao aumento indiscriminado do uso dos metais causou um sem número de acidentes, fundamentalmente no setor ferroviário. Descarrilamentos de vagões devido às fraturas de rodas, eixos e trilhos são um exemplo típico de acidentes ocorridos na época.

Na Grã-Bretanha cerca de 200 pessoas morreram nas décadas de 1860 e 1870 em função de acidentes ferroviários (Pastoukhov & Woodward., 1995). O fenômeno da fadiga ainda não era devidamente compreendido e, gradualmente, o fato de que defeitos internos preexistentes poderiam originar trincas e causar fraturas foram cada vez melhor entendidos. O nível de



acidentes foi reduzido somente quando ocorreu um aprimoramento do processamento metálico, um aumento do conhecimento científico sobre os fenômenos responsáveis pelas falhas mecânicas e uma melhor compreensão das variáveis que interferem no comportamento mecânico dos materiais.

Dentro da evolução histórica, um novo período consagrado pelas fraturas do tipo frágil teve início. As principais estruturas que sofreram com esse tipo de fratura foram pontes, tanques, dutos e vasos de pressão, todas contendo uniões por processo de solda. As primeiras documentações reportam-se desde 1886.

Estudos realizados por volta de 1918 mostraram que materiais de baixa tenacidade tendiam a se romper de forma instável, potencializado quando o material se encontrava em baixas temperaturas e com defeitos localizados. Conforme Sanz, citado por Delforge (1994), vários acidentes grandiosos ocorreram por conta desse fenômeno, como as pontes do Zoológico de Berlim em 1936, do canal de *Albert* na Bélgica em 1938 e de *Quest des Trois Rivières* no Canadá em 1951. Um outro exemplo famoso refere-se à fratura da ponte soldada *Point Pleasant*, na cidade de mesmo nome, *West Virginia*, Estados Unidos. O acidente, ocorrido em 15 de dezembro de 1967, causou a morte de 46 pessoas.

No entanto, as falhas frágeis ocorridas com os navios da série *Liberty*, utilizados pelos Estados Unidos na segunda grande guerra mundial, incitou os estudiosos ao estudo do problema da fratura frágil. Dos 4694 navios fabricados por solda elétrica, 1289 apresentaram fraturas, sendo 233 com perda total. 19 deles chegaram a se partir completamente ao meio. Esses acidentes mostraram que aços doces, caracteristicamente dúcteis, podem se tornar frágeis sob certas condições, tal como a influência do abaixamento da temperatura.

Após o período da segunda guerra mundial, apesar do aumento no consumo de energia e de materiais, a utilização racional de recursos determinou inevitavelmente que as estruturas fossem constituídas de materiais mais resistentes e leves, projetadas com coeficientes de segurança reduzidos.

Os materiais de alta resistência foram amplamente explorados em projetos aeronáuticos. Uma série de falhas estruturais ocorreu devido à utilização desses materiais, pois o aumento de resistência geralmente conduz a um aumento da suscetibilidade ao entalhe ou à diminuição da tenacidade à fratura.



1.2 Escopo e Estrutura do Trabalho

Há no Brasil um número reduzido de máquinas instrumentadas Charpy e de propostas para estudo desses equipamentos. Em princípio, segundo o levantamento realizado, existem máquinas com tal característica no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL - localizado no Rio de Janeiro, na Universidade Federal de Minas Gerais, na Universidade de São Paulo, campus de São Carlos, e na Universidade Estadual Paulista, campus de Ilha Solteira.

Nota-se, em princípio, que o interesse em estudar a instrumentação do ensaio Charpy vem decrescendo ao longo dos anos, salvo melhor juízo. As empresas prestadoras de serviços e as instituições de pesquisa estão, cada vez mais, na condição de usuários do equipamento do que empenhados propriamente na instrumentação, que traz consigo complexidades intrínsecas ao processo, originadas devido ao tipo de carregamento dinâmico e à própria estrutura da máquina de ensaio.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o processo de instrumentação de uma máquina de ensaio Charpy, suas vantagens, limitações e complexidades, implementar formas de instrumentação em uma máquina convencional e realizar alguns testes como forma de avaliar as instrumentações empregadas. A instrumentação da máquina visa o entendimento de todo o sistema de medida, do transdutor de força ao tratamento dos sinais obtidos. Por sua vez, a utilização de uma máquina instrumentada adquirida comercialmente não permite compreender os pormenores do funcionamento e os requisitos eletrônicos para uma adequada operação.

O aprimoramento da máquina de ensaio Charpy anteriormente instrumentada por conta de um trabalho de mestrado, consolida os motivos pelos quais procurou-se estudar o processo de instrumentação e medir a tenacidade à fratura sob carregamento de impacto. A natural evolução tecnológica de sistemas eletrônicos de aquisição e de *softwares* de suporte aliada à recente normatização do ensaio e últimas publicações científicas sobre o assunto reforçam a motivação para a realização desse trabalho de pesquisa.

Esse documento está dividido e organizado em 6 capítulos e 3 apêndices, os quais contêm informações complementares deslocadas dos referidos capítulos. O propósito é tornar a leitura mais rápida e evitar interrupções inadequadas do texto. Apresenta-se no Capítulo 1 um breve ordenamento histórico das falhas mecânicas e conceituações básicas acerca da fratura nos materiais metálicos. Além disso, a motivação e os objetivos que fundamentaram a execução deste trabalho, bem como a estrutura do documento também são descritos.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica que norteia o assunto estudado. Um levantamento bibliográfico é detalhado em sua parte introdutória. As fundamentações teóricas que explicam e se relacionam ao trabalho são mostradas nos itens que abordam os ensaios Charpy convencional e instrumentado, além de noções gerais sobre sistemas de medidas e transdutores.

Encontra-se no Capítulo 3 uma descrição sobre os materiais metálicos empregados na execução dos testes. A metodologia experimental está subdividida em duas etapas. A primeira utiliza, como elementos transdutores, extensômetros elétricos de resistência posicionados no martelo pendular. A segunda etapa refere-se à utilização de transdutores piezoelétricos fixados na base de apoio dos corpos de prova. A descrição experimental, a especificação dos equipamentos e as adaptações da máquina de ensaio, entre outros assuntos, são detalhados neste capítulo.

O Capítulo 4 apresenta a totalidade dos resultados experimentais das duas etapas do processo de instrumentação. As curvas de calibração das células de carga *força vs tensão*, as curvas de resposta dos condicionadores de sinais *tensão vs frequência* e o conjunto de curvas medidas para os diversos materiais ensaiados, tais como *força vs tempo* e *força vs deslocamento*, são mostrados. De uma maneira compacta e quantitativa, os valores de energia e de tenacidade à fratura dinâmica aparente são expostos em forma de tabelas e gráficos.

Os Capítulos 5 e 6 descrevem, respectivamente, a discussão e as conclusões sobre os resultados alcançados. Algumas variáveis foram estudadas de modo a avaliar e qualificar as instrumentações efetuadas. A influência da microestrutura dos corpos de prova, bem como da taxa de carregamento na medida da propriedade proporcionaram melhor compreensão acerca da instrumentação. As conclusões estão dispostas na forma de tópicos curtos e objetivos, e ainda contêm propostas de futuros trabalhos que podem dar continuidade no processo de instrumentação e conduzir melhorias no sistema.

Finalmente, após às referências bibliográficas, encontram-se os três apêndices do documento. O Apêndice A mostra as fotografias de alguns detalhes que auxiliam no entendimento das explanações expostas nos capítulos precedentes. No Apêndice B é sintetizada a estrutura da implementação computacional elaborada para o tratamento matemático dos resultados. O Apêndice C refere-se ao tratamento estatístico de todas as medições efetuadas no decorrer do trabalho.



Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Como ocorre com todos os ensaios mecânicos, o ensaio Charpy clássico possui vantagens e limitações. As principais vantagens dizem respeito à facilidade de execução e a obtenção rápida dos resultados, lidos diretamente no mostrador da máquina de ensaio. A principal limitação relaciona-se à pouca informação extraída do processo de fratura, isto é, apenas a energia global de ruptura do corpo de prova pode ser medida. A instrumentação adequada da máquina torna o ensaio mais rico e os resultados mais proveitosos.

É possível acompanhar o processo de fratura dos materiais ensaiados e obter informações adicionais quando se compara com o ensaio convencional. Todavia, com a inserção da instrumentação, qualquer que seja sua forma, alguns problemas podem surgir durante as etapas do processo, isto é, desde a escolha do tipo de transdutor, sua localização na máquina de ensaio, até a obtenção dos sinais força vs tempo, sua interpretação e validação.

A forma de instrumentação mais comumente implementada é por meio de extensômetros elétricos de resistência posicionados no martelo pendular. Existe uma infinidade de combinações que relacionam tipo e localização dos extensômetros objetivando sempre a busca por confiabilidade nos resultados. No âmbito mundial, Ireland (1977), dos Estados Unidos, firmou-se como um ícone no estudo aprofundado da instrumentação aplicada ao ensaio Charpy convencional, sobretudo durante a década de 70.

Análises minuciosas sob sua ótica geraram diversas implicações e condições necessárias que norteiam e validam até hoje a adequada instrumentação. Publicou diversos trabalhos e participou de inúmeras conferências científicas, tal como a *International Conference of Dynamic Fracture Toughness*, promovida pela *American Society for Metals - ASM* - em 1977 na Inglaterra.



Böhme & Kalthoff (1982), do Instituto de Materiais de Freiburg - Alemanha, estudaram o comportamento de corpos de prova entalhados bi-apoiados submetidos a cargas de impacto. Construídos de resina epoxy e com dimensões maiores que as utilizadas no ensaio Charpy convencional, os corpos de prova foram submetidos a uma massa de impacto de 4,9kg e velocidade de 1m/s. Os sinais força vs tempo foram medidos e comparados por meio de extensômetros elétricos posicionados no topo do martelo de impacto e na base de apoio dos corpos de prova.

Estudos mais recentes, porém em menor número, têm trazido valiosas contribuições, pois uma das grandes aplicações do ensaio Charpy instrumentado refere-se ao estudo de vasos de pressão e reatores nucleares, onde a microestrutura e as propriedades mecânicas dos componentes sofrem fortemente com a variação da temperatura e irradiação oriunda do processo térmico envolvido. Um monitoramento contínuo dessas peças torna-se necessário para preservar a integridade estrutural dos componentes. Neste contexto, o ensaio Charpy instrumentado apresenta um papel essencial, uma vez que fornece uma quantidade maior de informações em comparação ao ensaio Charpy convencional.

Yamamoto & Kobayashi (1993), da Universidade Tecnológica de Toyohashi - Japão, desenvolveram um sistema de avaliação da tenacidade à fratura dinâmica auxiliada por computador, associando-o à máquina de ensaio Charpy convencional. Por meio desse sistema denominado *Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing - CAI* - é possível determinar a tenacidade à fratura dinâmica, dada pelos parâmetros K_{I_d} e J_{I_d} , além das energias obtidas com base nas curvas força vs deflexão, oriundas de corpos de prova Charpy-V pré trincados.

Uma pesquisa sobre tenacidade à fratura dinâmica de materiais soldados utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares foi publicada por Schmitt et al. (1994) no *International Journal of Pressure Vessels & Piping*. Nesse estudo, avaliou-se a propriedade utilizando corpos de prova com lados entalhados e validou os resultados por meio da simulação numérica. A instrumentação fundamentou-se na colagem de extensômetros no topo do martelo pendular e nos corpos de prova, próximos ao ponto de apoio na máquina de ensaio.

Um outro trabalho, realizado por Aggag & Takahashi (1996), do Instituto de Pesquisa de Mecânica Aplicada - Japão, estudou a influência de filtros elétricos e mecânicos aplicados ao ensaio Charpy instrumentado no intuito de melhorar a qualidade dos sinais obtidos. Extensômetros elétricos de resistência foram devidamente colados tanto no martelo pendular como nas proximidades da raiz do entalhe dos corpos de prova. Os filtros mecânicos foram

implementados utilizando-se laminas de borracha de diferentes espessuras e comparou-se os sinais medidos para todos os casos considerados.

Perosanz et al. (1998), do Instituto de Tecnologia Nuclear de Madri - Espanha, apresenta resultados de tenacidade à fratura dinâmica utilizando o ensaio Charpy instrumentado de dois aços: um de uso comum e outro típico de aplicações em vasos de pressão de reatores nucleares. Uma forma de obtenção da velocidade e deslocamento do martelo durante o processo de fratura dos corpos de prova também foi apresentada. Ela baseia-se nas integrações da curva força vs tempo considerando a massa do martelo e a lei do movimento de Newton.

Böhme et al. (1999), do Instituto de Materiais de Freiburg - Alemanha, publicou um trabalho de pesquisa no *Nuclear Engineering and Design* que avalia e compara a dispersão dos resultados de tenacidade à fratura dinâmica e monotônica, medidos em diferentes temperaturas na região de transição de aços ferríticos utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares. Os ensaios de tração monotônica, dinâmica e Charpy instrumentado foram comparados.

O efeito da temperatura e da taxa de carregamento na tenacidade à fratura dinâmica de aços estruturais foi estudado por Cun-Jian (1999), do Departamento de Pesquisa em Soldagem - China. Seu trabalho, publicado no *Materials and Design*, utiliza uma máquina de ensaio Charpy instrumentada como ferramenta para determinar a tenacidade à fratura dinâmica e estudar as influências dessas variáveis.

No Brasil, poucas instituições de pesquisa têm se dedicado ao estudo do ensaio Charpy instrumentado. O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPTEL - uma empresa do sistema Eletrobrás criada em 1974, vem utilizando uma máquina de ensaio Charpy instrumentada há algumas décadas. Localizada na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro, este centro de pesquisa realiza, entre outras atividades, trabalhos em pesquisa e desenvolvimento, ensaios, certificações, perícias e consultorias. Em projetos conjuntos com a Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, gerou alguns trabalhos de mestrado, como alguns estudos sobre o comportamento à fratura dinâmica de materiais poliméricos compostos.

Delforge (1994), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Ilha Solteira, em conjunto com o Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Campinas - UNICAMP, por meio de um trabalho de mestrado, promoveu a instrumentação do pêndulo de uma máquina de ensaio Charpy convencional. Utilizando extensômetros elétricos de resistência devidamente fixados no martelo pendular, foram determinados diversos valores de tenacidade à fratura dinâmica aparente de materiais metálicos, tais como aços ABNT 1020, 4140 e 300M, de qualidade aeronáutica, além



da liga de alumínio Al 7050 T76. Diversas taxas de carregamento e temperaturas de ensaio foram efetuados no sentido de avaliar a performance da instrumentação implementada.

Quinan (1996), no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, realizou uma análise do ensaio de impacto Charpy instrumentado, também num trabalho de mestrado, recorrendo-se a extensômetros elétricos de resistência, como elementos transdutores, posicionados no martelo pendular. Um modelo numérico de distribuição de deformações foi desenvolvido utilizando o *software* de modelagem ANSYS. O objetivo foi avaliar a qualidade da colagem dos extensômetros mediante a comparação dos resultados de deformação apresentados pelos modelos numérico e experimental.

Alguns materiais, tais como aços ABNT 1045, tratados termicamente por têmpera, revenido ou normalização em várias temperaturas, bem como a liga de alumínio X6221 ensaiada à temperatura ambiente, foram utilizados como corpos de prova para validar o estudo. Determinou-se, além das curvas força vs tempo típicas do ensaio Charpy instrumentado, as respectivas energias calculadas por meio das próprias curvas e comparou com os valores de energia obtidos diretamente do mostrador da máquina, considerados como valores de referência.

A Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, adquiriu no final de 2000, pelo Departamento de Engenharia de Materiais, uma máquina de ensaio Charpy instrumentada da marca *Instron Wolpert*. A instrumentação, por extensômetros elétricos, posiciona-se no cutelo do martelo pendular.

A aquisição e o tratamento dos sinais são efetuados por pacote computacional confeccionado pela *National Instruments*, adquirido em conjunto com a máquina. Pretende-se, a partir de 2001, utilizar a máquina para caracterizar dinamicamente alguns materiais aplicados em reatores nucleares afetados por irradiação. A proposta é trabalhar em conjunto com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN.

2.2 Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos são procedimentos ou testes experimentais realizados para determinação das propriedades mecânicas de um dado material em análise. Existem duas classes de ensaios: os destrutivos e os não destrutivos. Na categoria dos ensaios destrutivos, são classificados os ensaios de tração, dobramento, flexão, torção, fadiga, impacto, compressão e outros (Souza, 1995). O ensaio de dureza, que em alguns casos pode causar a inutilização da



peça ensaiada, está classificado nessa categoria. Dentre os ensaios não destrutivos, podem ser citados os ensaios com raio X, ultra-som, metrológicos, líquidos penetrantes, partículas magnéticas, entre outros exemplos.

Quando os ensaios visam controlar a produção de uma determinada indústria, eles são denominados ensaios de rotina. Esses ensaios não requerem grande precisão dos resultados. Podem ser executados em laboratórios de análise ou propriamente dentro da empresa. Em contrapartida, quando o foco é a determinação de propriedades mecânicas para fins de estudo e pesquisa de materiais, devem utilizar-se máquinas mais sensíveis e precisas.

De forma geral, os ensaios mecânicos destrutivos determinam propriedades mecânicas (Mei & Silva, 1988). O propósito é medir a resistência do material a esse tipo de solicitação mecânica. Dentre os esforços aplicados, destacam-se os de tração, compressão, flexão, torção e cisalhamento. A escolha do tipo de ensaio mecânico mais adequado para cada tipo de material metálico depende da finalidade do material, dos esforços que esse material vai suportar e das propriedades mecânicas que se deseja medir.

A quantidade e o tamanho dos corpos de prova constituem-se nos dois principais fatores determinantes para a realização de um dado ensaio mecânico. A maneira tal como as amostras devem ser retiradas do material para a execução dos testes também necessita ser especificada, para que as amostras sejam representativas do material a ser ensaiado. A possibilidade de variações nas propriedades, conforme a orientação da amostra ou a região de retirada no material, pode comprometer os resultados. Esse fenômeno é conhecido como anisotropia. Materiais trabalhados mecanicamente, como os laminados, forjados e estirados possuem alto índice anisotrópico.

O aperfeiçoamento de um material metálico e o controle de produção podem ser feitos por intermédio de ensaios mecânicos. Analogamente, o projeto de um componente mecânico e a seleção de um dado material são feitos tomando-se por base as propriedades mecânicas do material a ser utilizado. Os ensaios mecânicos também podem servir para comparar materiais distintos.

Alguns ensaios permitem determinar resultados que podem ser diretamente aplicados nos cálculos das tensões de trabalho ou no projeto de uma peça. Outros, porém, fornecem apenas dados de ordem comparativa ou qualitativa do material e servem somente para auxiliar ou completar o estudo ou o projeto. Os ensaios podem ainda ser classificados de acordo com sua velocidade de execução ou tipo de carregamento aplicado. A Figura 2.1 apresentada a seguir



systematiza as principais características de cada classe de ensaio, baseadas na taxa de carregamento, conforme Nicholas (1992).

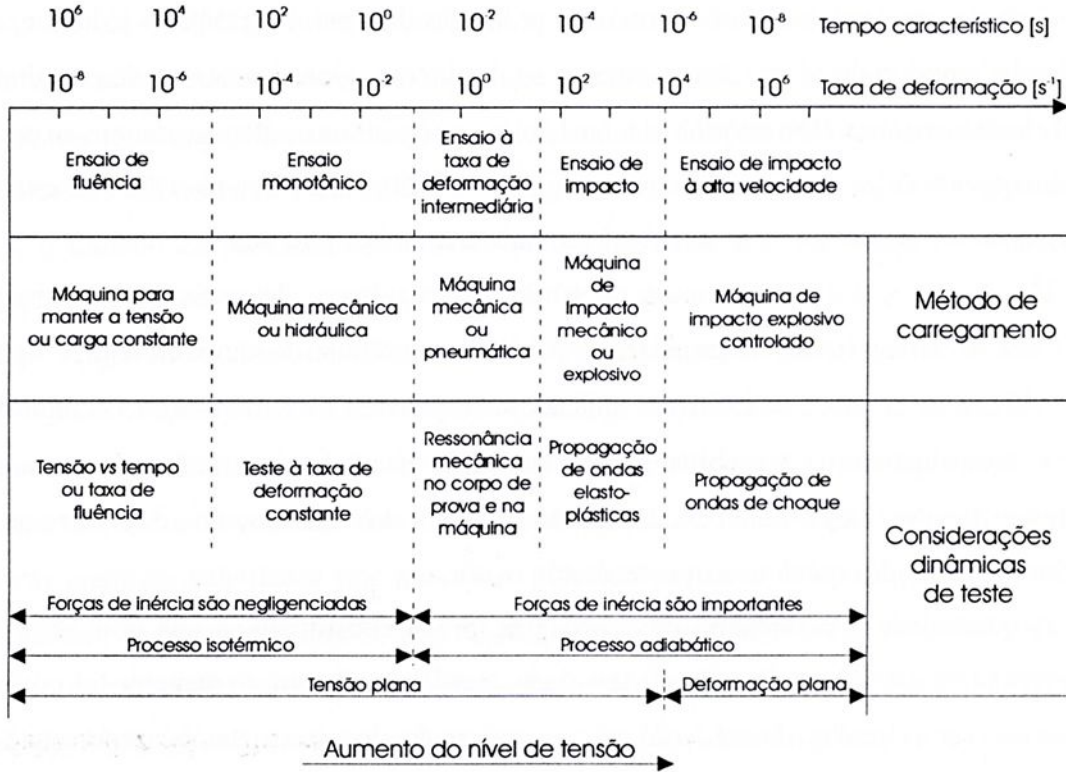


Figura 2.1 - Aspectos dinâmicos dos ensaios mecânicos.

(Fonte: Nicholas, 1992)

2.3 Ensaio de Impacto Charpy e Izod

Os ensaios de impacto são assim denominados por serem ensaios dinâmicos onde altas taxas de deformação são aplicadas nos procedimentos de teste. Os principais responsáveis pela maioria das falhas do tipo frágil que ocorrem em serviço são descontinuidades, que introduzem um estado triaxial de tensões, tal como o que existe na raiz de um entalhe, e baixas temperaturas. Porém, uma vez que estes efeitos são acentuados a uma taxa de carregamento elevada, vários tipos de ensaios de impacto têm sido utilizados para determinar a suscetibilidade dos materiais à fratura frágil (Dieter, 1988).

Os ensaios Charpy e Izod são aprimoramentos de ensaios que foram desenvolvidos e colocados em prática no início do século XX. Esses testes detectam diferenças não observáveis em um ensaio monotônico, tal como o ensaio de tração. Nos ensaios de impacto, corpos de prova



entalhados são submetidos ao impacto de um dado peso sob temperaturas conhecidas em uma máquina pendular (Ferrante, 1996). Os resultados apresentados são obtidos na forma de energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto em função da temperatura (Broek, 1995).

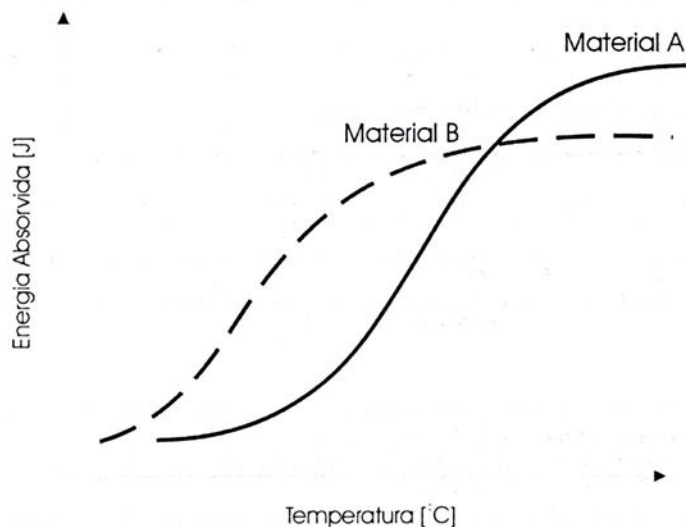


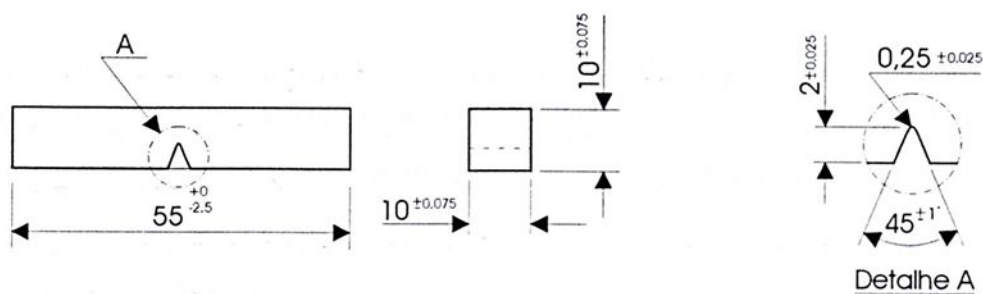
Figura 2.2 - Resultado típico do ensaio Charpy clássico para dois materiais distintos A e B.

(Fonte: Dieter, 1988)

Um grande número de corpos de prova com geometrias diferentes é utilizado para compor as duas classes de ensaios mais usuais. As amostras Charpy são mais comumente aplicadas nos Estados Unidos, enquanto os corpos de prova Izod são mais utilizados na Europa. Ambos são normalizados segundo a *American Society for Testing and Materials*, norma ASTM E-23.

O corpo de prova Charpy possui comprimento de 55mm, uma seção quadrada de 10mm e apresenta um entalhe em V, com ângulo de abertura igual a 45° e profundidade de 2mm. O raio da raiz do entalhe mede 0,25mm. A amostra é apoiada como uma viga no suporte de apoio. O impacto, à velocidade de 5m/s, ocorre no lado oposto ao do entalhe por um pêndulo de aproximadamente 20kg. O corpo de prova é forçado a se dobrar a uma elevada taxa de deformação, da ordem de 10^3 s^{-1} .

O corpo de prova Izod, raramente utilizado hoje em dia, também possui uma seção quadrada de 10mm e um comprimento de 75mm. O entalhe é construído à 28mm de uma das extremidades e contém os mesmos característicos do entalhe Charpy. No ensaio Izod, os corpos de prova são engastados na base da máquina. A Figura 2.3 mostra o desenho e as dimensões do corpo de prova Charpy-V.



Acabamento Superficial: $2\mu\text{m}$ na superfície do entalhe e no lado oposto e $4\mu\text{m}$ nas outras superfícies
 Tolerância geométrica nas superfícies da seção transversal: $90^{\circ} \pm 10'$

Figura 2.3 - Corpo de prova Charpy normalizado pela ASTM E-23.

(Fonte: American Society for Testing and Materials, 1996)

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, pode ocorrer uma grande dispersão dos resultados. Essa dispersão se deve também às variações locais nas propriedades dos aços - material mal elaborado - enquanto outras ocorrem devido às 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 pauta 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 do nível de tensão, o que dificulta correlacionar a energia absorvida com o desempenho em serviço.

Segundo Dieter (1988), pode-se distinguir três categorias distintas de materiais metálicos quando focados pela 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 distinguem 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 e Zinco 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 à 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.

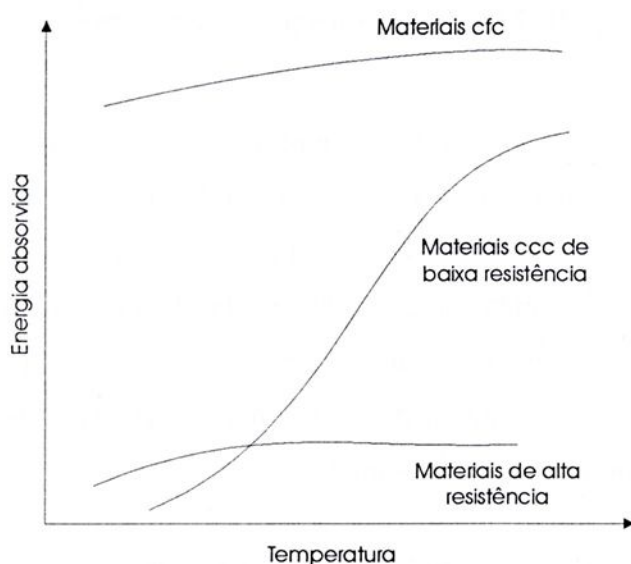


Figura 2.4 - Efeito da temperatura na tenacidade.

(Fonte: Dieter, 1988)

A principal aplicação do ensaio Charpy na engenharia fundamenta-se na seleção de materiais resistentes à fratura frágil. 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 a tenacidade dos materiais é finita mesmo no patamar superior da curva de transição.

Diversos fatores interferem no resultado da energia absorvida pelo corpo de prova ou na temperatura de transição. De um modo geral, esses fatores podem ser divididos em fatores físicos e metalúrgicos. Composição química, tipo de tratamento térmico, tamanho de grão e orientação dos corpos de prova constituem-se nos fatores metalúrgicos. Os fatores físicos são forma e tamanho do corpo de prova, tipo de entalhe e taxa de deformação.

2.4 Sistemas de Medida e Instrumentação

Um instrumento de medida tem a função de prover uma dada informação de um valor físico acerca de alguma variável que está sendo medida. Em casos simples, esses instrumentos constituem-se de uma única unidade que fornece um sinal de saída de acordo com a amplitude da variável desconhecida sobre a qual se está efetuando a medição. No entanto, em situações de medidas mais complexas, um instrumento de medida pode consistir de vários elementos isolados. Um sistema de medida, de uma forma geral, pode ser definido pelos seguintes componentes apresentados na Figura 2.5.

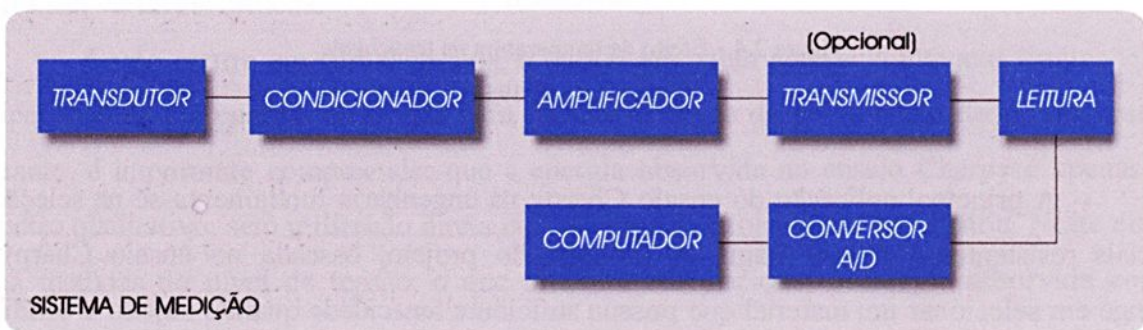


Figura 2.5 - Sistema geral de medição.

Esses componentes podem estar contidos em uma ou em várias estruturas separadas fisicamente ou não. Devido à natureza modular desses elementos encontrada hoje em dia, um instrumento de medida é comumente referido como um sistema de medida ou uma cadeia de medição. O transdutor é comum para qualquer sistema de medida. Ele fornece um sinal de saída que é função da variável medida, isto é, do sinal de entrada. Para a maioria dos transdutores, essa função é aproximadamente linear.

O sinal de saída de um transdutor é freqüentemente dado em uma forma indireta ou diferente daquela normalmente requerida e deve ser convertido para uma forma adequada por meio de uma calibração. Por exemplo, a medida de deslocamento utilizando extensômetros elétricos de resistência fornece um sinal de saída na forma de uma variação das resistências. Esta variação é convertida em uma mudança no nível de tensão dada pelo circuito em ponte de *Wheatstone*.

Os elementos de processamento do sinal têm como função melhorar a qualidade do sinal de saída de um sistema de medida. Os tipos mais comuns são os condicionadores e os amplificadores que promovem um aumento da amplitude do sinal de saída fornecido pelo transdutor e ajustam as impedâncias entre o sinal de entrada e o de saída. Podem conter filtros e minimizadores de ruídos para evitar erros de leitura e interferências externas na aquisição do sinal. Estes elementos são extremamente importantes para o caso em que o nível do sinal de saída é baixo.

A observação do sinal de saída por vezes é efetuada a distâncias relativamente significativas do transdutor. Para estes casos, alguns mecanismos de transmissão desse sinal se fazem necessários. O elemento de transmissão do sinal é tradicionalmente composto de um circuito eletrônico e cabos especiais que minimizam qualquer influência externa durante a aquisição, transferência e armazenamento do sinal, como ruídos elétricos induzidos e efeitos de campos magnéticos.

O elemento final de uma cadeia de medição corresponde ao local onde o sinal medido é utilizado, que toma a forma de uma unidade de apresentação ou gravação desse sinal e é conhecido genericamente como o elemento que promove a leitura da saída fornecida.

Osciloscópios e escalas graduadas são alguns exemplos de elementos em que se pode efetuar a leitura de uma variável medida. No entanto, em alguns casos, ainda se faz necessário o armazenamento e o tratamento dessa informação. Os microcomputadores munidos de *softwares* específicos de aquisição e os conversores analógicos digitais executam essa função.

Os instrumentos podem ser subdivididos em classes separadas de acordo com diversos critérios. Estas classificações são baseadas, por exemplo, no custo, na precisão ou na aplicação dos instrumentos de medida. Uma dessas classificações diz respeito à forma do sinal de saída que o instrumento fornece ao usuário, caracterizando-se em ativo ou passivo. Os instrumentos passivos são caracterizados pela não dependência de energia externa durante o processo de medida e os instrumentos ativos possuem uma fonte de energia externa para promoverem a medição (Doebelin, 1976).



2.4.1 Tipos de Sinais

O termo sinal é utilizado para associar transmissão de informação. O sinal descreve uma variável física que é função do tempo e que interage com o próprio sistema de medida. Pode ser considerado como a entrada ou a saída do sistema de medida. Na realidade, um sinal é uma informação de uma variável qualquer medida que está sendo transmitida pelo sistema de aquisição, condicionamento e gravação, isto é desde o transdutor até o gravador.

Segundo Figliola & Beasley (1991), os sinais podem ser classificados como determinísticos, isto é, aqueles que possuem um comportamento que pode ser representado adequadamente por uma função matemática, e sinais não determinísticos, aqueles que possuem um comportamento aleatório, passíveis de serem tratados por ferramentas estatísticas.

A classe dos sinais determinísticos subdividi-se em estacionários ou estáticos, por não dependerem da variável tempo, e não estacionários ou dinâmicos, por possuírem uma dependência do tempo. Por sua vez, os sinais dinâmicos podem ser periódicos, por apresentarem um padrão de repetição com o tempo, e transitórios ou transientes, cuja amplitude diminui ao longo do tempo até atingir valor nulo. A Figura 2.6 resume essa caracterização.

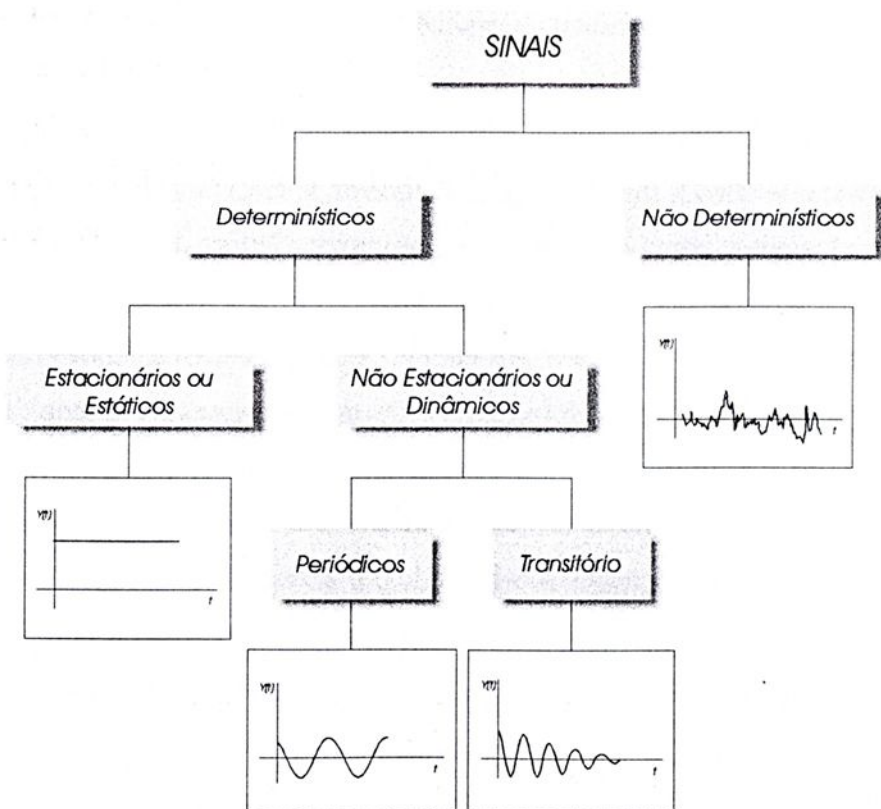


Figura 2.6 - Classificação dos sinais.

Os sinais também podem ser classificados como sinais analógicos ou digitais. O termo analógico descreve um sinal contínuo no tempo. Visto que as variáveis físicas tendem a ser contínuas na natureza, um sinal analógico fornece uma pronta representação de seu comportamento dependente do tempo. Um sinal analógico é mostrado na Figura 2.7. Ele pode ser associado ao resultado de uma rotação contínua do ponteiro de um relógio ou mostrador qualquer.

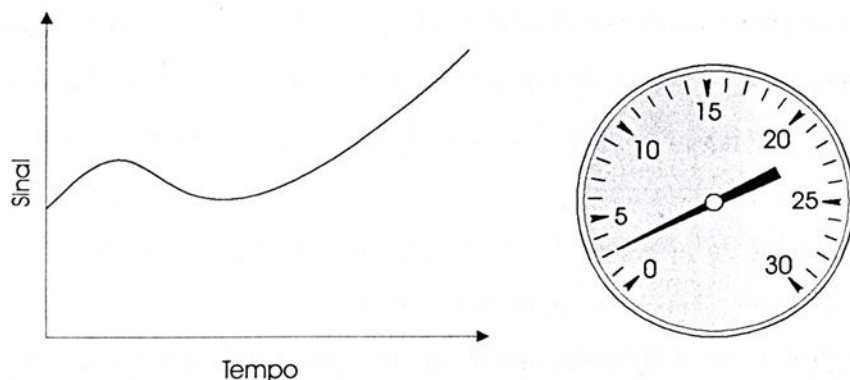


Figura 2.7 - Sinal analógico associado ao movimento do ponteiro de um relógio.

(Fonte: Figliola & Beasley, 1991)

Ao contrário do sinal analógico ou contínuo, um sinal digital é um sinal que foi particionado em pequenos intervalos (Newland, 1975). Também é conhecido como sinal discreto no tempo. A informação da amplitude do sinal pode ser apenas avaliada nos pontos discretos na base de tempo. A Figura 2.8 apresenta um exemplo de um sinal digital. Geralmente, os sinais digitais resultam da amostragem de uma variável contínua sob intervalos de tempo finitos.

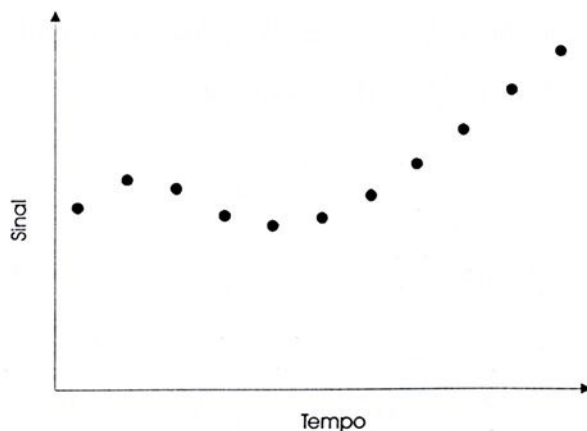


Figura 2.8 - Representação de um sinal digital.

(Fonte: Figliola & Beasley, 1991)

Os sinais digitais são particularmente úteis quando a aquisição e processamento de dados medidos são executados utilizando-se um computador digital. Um sinal digital apresenta duas importantes características. Primeiro, o sinal digital existe somente nos valores de tempo discretos. Segundo, a magnitude ou amplitude é determinada pelo processo de quantização. A quantização designa um único valor para representar uma faixa de amplitudes de um sinal contínuo.

Um sinal analógico pode ser convertido em um sinal digital, ou vice-versa, utilizando-se um conversor analógico-digital A/D. É um dispositivo que converte um sinal de voltagem analógica em um sistema de representação baseado em valores binários. A resolução limitada do número binário que corresponde à faixa das voltagens gera o processo de quantização.

Inúmeros tipos e formas de sinais podem ser associados aos fenômenos físicos normalmente encontrados nos mais variados sistemas mecânicos. Um eixo rotativo, por exemplo, devidamente instrumentado, pode gerar um sinal senoidal, que traz consigo informações importantes, tal como sua frequência de rotação.

Um par engrenado, quando monitorado, pode fornecer dados sobre frequências de giro, de engrenamento e outras frequências inerentes ao sistema, além de permitir a identificação de defeitos, por exemplo no dentado, pelo aparecimento de sinais transientes em meio aos periódicos quando se utiliza ferramentas computacionais de processamento e análise, tais como Transformada Rápida de *Fourier*, *Wavelet* e Demodulação Temporal, entre outras.

O ensaio Charpy, por se tratar de um teste de impacto em que o martelo pendular colide com a amostra ensaiada, quando devidamente instrumentado, pode gerar um sinal do tipo impulsivo. Muitas informações podem ser associadas ao fenômeno físico e extraídas do processo de medida. Existem ainda outros tipos de sinais, como rampa, degrau e exponencial. A Figura 2.9 mostra esquematicamente alguns desses exemplos.

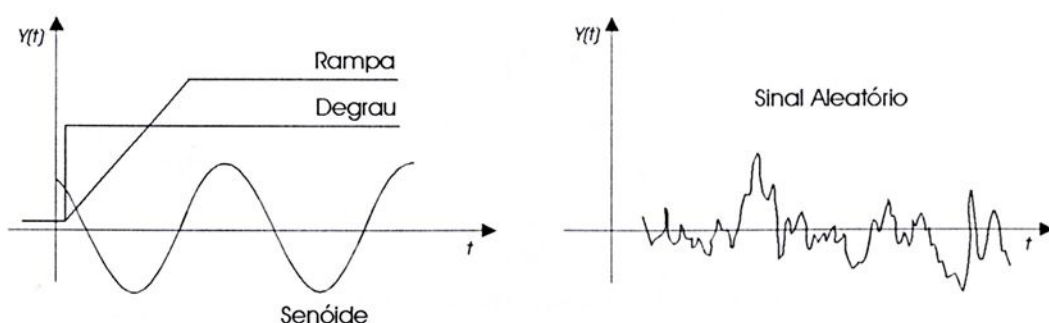


Figura 2.9 - Exemplos de sinais dinâmicos. (Fonte: Figliola & Beasley, 1991)

Os sinais impulsivos são caracteristicamente determinados pelo tempo de duração curto ou repentino e, por consequência, esse tipo de sinal apresenta banda larga de frequência. Pode ser definido como uma maneira de transferência de energia cinética de um dado sistema para outro. O sinal de impacto é considerado como tal quando seu tempo de ocorrência for pequeno em relação ao período natural de oscilação do sistema. Pode ser representado por um pulso retangular, por um pulso dente de serra ou por um meio seno, como mostra a Figura 2.10.

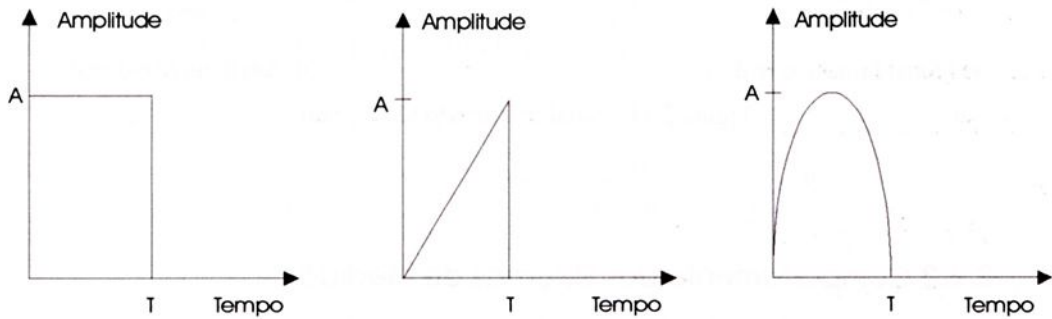
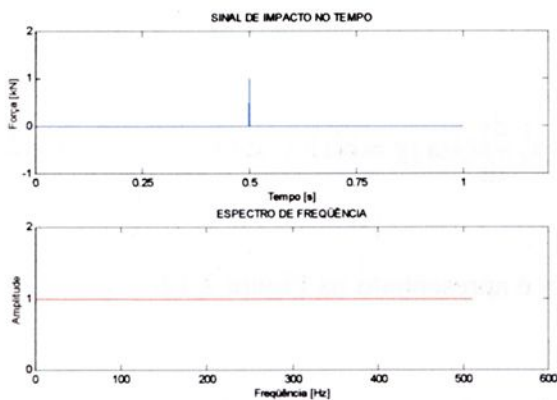


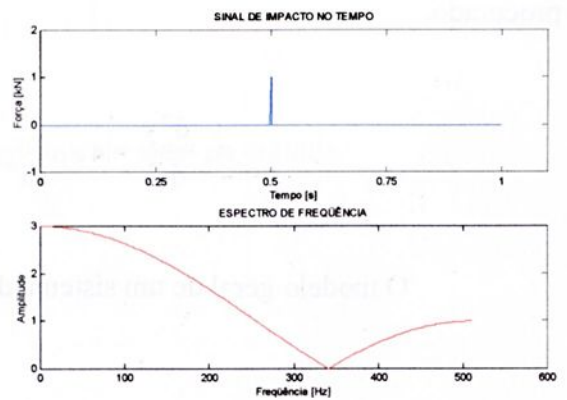
Figura 2.10 - Exemplos de modelagens de sinais impulsivos.

(Fonte: Broch, 1970)

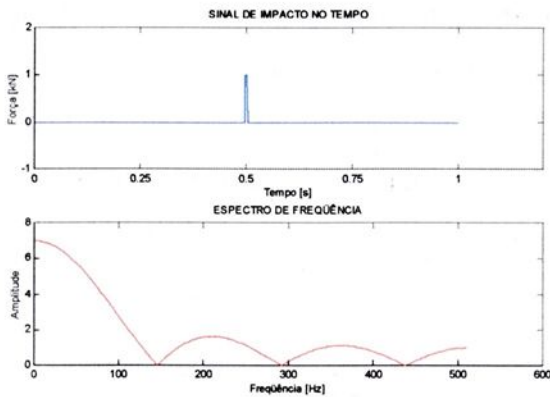
Um sinal impulsivo ideal, aquele que não se encontra na prática, possui as duas porções do sinal, a subida e o decaimento, posicionados no mesmo valor de tempo. Seu espectro de frequência apresenta a amplitude constante. O sinal real, por menor que seja o tempo de impacto, apresenta um distanciamento entre as porções de subida e decaimento ou, equivalentemente, uma abertura em sua base. Neste caso, seu espectro de frequência apresenta uma diminuição na amplitude com o aumento frequência. Quanto maior esse distanciamento ou abertura, maior é o tempo de impacto ocorrido no sistema e menor é o valor da frequência em que amplitude do sinal diminui. A Figura 2.11 ilustra esta questão.



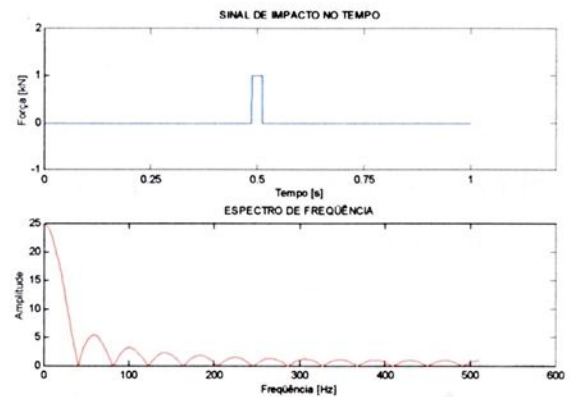
(a) Sinal impulsivo ideal.



(b) Sinal impulsivo real.



(c) Sinal impulsivo real.



(d) Sinal impulsivo real.

Figura 2.11 - Sinal de impacto ideal e real.

2.4.2 Comportamento dos Sistemas de Medida

O comportamento de um sistema de medida sujeito a um sinal de entrada particular define a resposta do sistema para aquela entrada. O bom entendimento sobre o sistema se faz necessário devido à interpretação prévia e a relação entre o sinal de entrada e o de saída. É de fundamental importância e de grande utilidade definir o comportamento do sistema de medida em função de sua capacidade em fornecer o sinal de resposta num tempo esperado.

Cada sistema de medida responde distintamente para vários tipos de sinais de entrada. Para adquirir a informação precisa e correta acerca do sinal de entrada, baseada nas informações contidas no sinal de saída, é necessário conhecer o tempo ou a frequência 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 , Equação 2.1. A função $b(t)$ indica o sinal de entrada e a função $y(t)$ representa o sinal de saída procurado.

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b(t) \quad (2.1)$$

O modelo geral de um sistema de medida é apresentado na Figura 2.12.

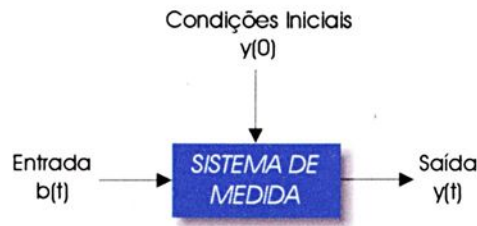


Figura 2.12 - Modelo matemático geral de um sistema de medida.

A maioria dos sistemas de medida pode ser modelada por uma equação diferencial ordinária linear de ordem 1, como a apresentada na Equação 2.2.

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b(t) \quad \text{ou} \quad \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + y = \frac{1}{a_0} b(t) \quad (2.2)$$

onde $\tau_s = a_1/a_0$ fornece uma medida do tempo de resposta do sistema e $K_s = 1/a_0$ é o ganho permanente do sistema. A constante de tempo τ_s 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.

A escolha do sistema de medida depende da frequência do sinal que se está medindo. Uma especificação inadequada do sistema pode acarretar erros e degenerações dos sinais obtidos. A diminuição da amplitude e a defasagem do sinal podem ocorrer se as frequências não estiverem compatíveis. A razão de amplitude $M(\omega)$ para um sistema de primeira ordem, dada pela Equação 2.3, exprime matematicamente este conceito. A Figura 2.13 lustra graficamente a diminuição de amplitude.

$$M(\omega) = \frac{y(t)}{b(t)} = \frac{1}{[1 + (\tau_s \omega)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.3)$$

onde $y(t)$ é a amplitude do sinal de saída e $b(t)$ é a amplitude do sinal de entrada.

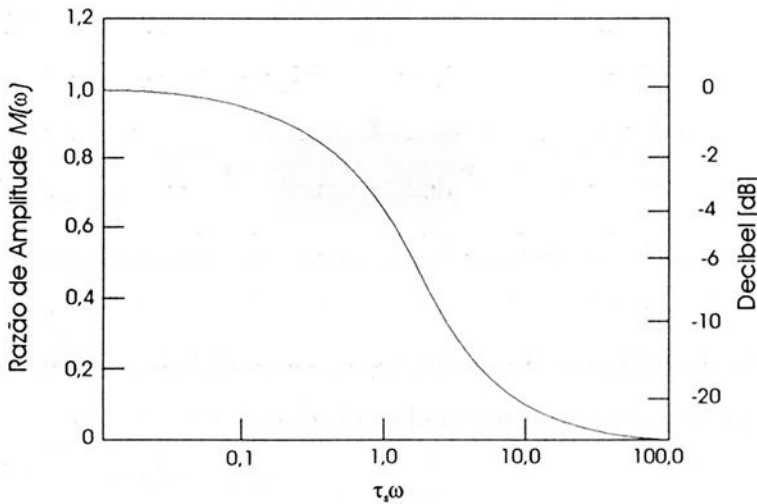


Figura 2.13 - Razão de amplitude para um sistema de medida de primeira ordem.

(Fonte: Figliola & Beasley, 1991)

Este comportamento pode ser explicado considerando a combinação das variáveis tempo de resposta do equipamento e frequência do sinal de entrada. Para os valores de $\omega\tau_s$ para os quais o sistema responde com valores de $M(\omega)$ próximos da unidade, a amplitude do sinal de entrada é transferida sem atenuação para o sinal de saída com pouco tempo de atraso, ou seja, o sinal não perde informação. Para grandes valores do produto $\omega\tau_s$, o sistema de medida causará uma atenuação do sinal de saída aliado a um maior atraso no fornecimento da resposta.

Portanto, se há necessidade de se medir sinais de alta frequência, tal como o ocorrido no ensaio Charpy, o sistema de medida deve ter um pequeno tempo de resposta. Um sistema que apresentar um elevado valor de τ_s , ou grande tempo de resposta, pode medir somente sinais de baixa frequência. O erro dinâmico $\delta(\omega)$, mostrado na Equação 2.4 abaixo, mede a adequabilidade de um dado sistema de medida em prover um sinal de saída satisfatório. Valores próximos de zero indicam a especificação correta do sistema de medida.

$$\delta(\omega) = 1 - M(\omega) \quad (2.4)$$

Para um sistema de primeira ordem, a largura da banda de frequência aceitável é definida tradicionalmente como a banda de frequência sobre a qual $M(\omega) \geq 0,707$. Considerando os valores de atenuação em decibéis, tem-se:

$$\text{dB} = 20 \log M(\omega) \quad (2.5)$$

Em outras palavras, é aceita normalmente uma atenuação máxima do sinal de aproximadamente 30% ou 3dB para a maioria das aquisições. Para o caso do ensaio Charpy, essa atenuação representa um valor muito alto, uma vez que o cálculo da propriedade é determinado considerando-se a força máxima ou a força de escoamento generalizado. Estudos mostraram que uma redução na amplitude de 10% ou 0,915dB é bem satisfatória.

Diversos estudos acerca da especificação mínima adequada do sistema de medida para aplicação no ensaio Charpy convergiram, num primeiro momento, para as recomendações da *American Society for Metals* - ASM. Alguns critérios foram propostos com a finalidade de garantir resultados confiáveis obtidos da instrumentação. Recentemente, uma normalização da *International Organization Standardization* estabelece, de uma forma objetiva e menos complexa, a especificação e metodologia mínimas para execução do ensaio. Esses dois procedimentos serão melhor abordados no item 2.5.

2.4.3 Transdutores e Sensores

Transdutores são dispositivos eletromecânicos que convertem uma dada energia de origem mecânica, tais como deslocamento ou força, em um sinal elétrico que pode ser monitorado pelo nível de tensão apresentado após seu condicionamento (Dally et al., 1993). Existem no mercado uma grande variedade de transdutores destinados às medidas das mais variadas quantidades mecânicas. As características dos transdutores, dentre as quais cita-se a faixa de operação, a linearidade, a sensibilidade e a temperatura de operação, são determinadas primariamente pelos sensores, incorporados nos transdutores para produzirem o sinal de saída elétrico.

Por exemplo, o conjunto de extensômetros compõe um transdutor, que por sua vez produz uma variação na resistência elétrica de um valor relativo $\Delta R/R$ proporcional ao carregamento aplicado. Cada extensômetro representa o elemento sensor neste transdutor de força e estabelece as características do transdutor. Os sensores utilizados no projeto de transdutores incluem potenciômetros, transformadores diferenciais, extensômetros, capacitores, cristais piezoelétricos, entre outros.

Dois tipos de transdutores serão apresentados aqui por fazerem parte integrante deste trabalho: o extensômetro elétrico e o transdutor piezoelétrico. O extensômetro elétrico de resistência é um elemento sensível para o qual pequenas variações de dimensões correspondem a



pequenas variações, diretamente proporcionais, de sua resistência elétrica. O aproveitamento dessa característica permite a avaliação da deformação sofrida pelo extensômetro mediante a medida da variação de sua resistência elétrica.

Se o extensômetro estiver submetido a uma Diferença de Potencial Elétrico, a sua deformação pode ser avaliada registrando-se a variação da DDP decorrente da variação de sua resistência elétrica. Em razão da grande facilidade e resolução conseguida na medida da DDP, os extensômetros elétricos passaram a ser largamente empregados para medir deformações em estruturas e em componentes especialmente projetados para atuarem como transdutores em medidas de pressão, força, tensão, deslocamento, temperatura e diversos outros instrumentos de medida. Tanto na análise das deformações quanto no projeto de transdutores, a aplicação dos extensômetros abrange campos desde a construção civil até práticas médicas cirúrgicas.

Em qualquer tipo de aplicação, a base da extensometria consiste na medida da deformação local de uma peça ou componente. A técnica baseia-se na fixação do extensômetro no local a ser medido, de modo que ele se distenda e contraia solidariamente ao corpo em análise, pois a deformação do extensômetro é diretamente associada à deformação do corpo estudado. As características da aplicação de extensômetros elétricos de resistência na medição de deformações podem ser resumidas da seguinte forma (Dally et al., 1993):

- resolução de medida infinita;
- grande precisão na medida;
- excelente linearidade;
- excelente resposta a sinais dinâmicos;
- fácil de instalar;
- baixo custo;
- possibilita a tomada de sinais à distância;
- facilmente protegido contra meios agressivos.

Em virtude dessas vantagens, atualmente o domínio da técnica de utilização dos extensômetros elétricos de resistência é indispensável a qualquer equipe que se dedique ou esteja envolvida com trabalhos de medições. O extensômetro é basicamente uma resistência elétrica montada sobre uma base de material isolante, orientada segundo a sua direção de sensibilidade à deformação. A sua classificação pode ser feita com base no material de sua resistência, no material da base e na configuração de montagem.



Atualmente, existe no mercado uma gama muito grande de extensômetros elétricos de resistência oferecendo praticamente um tipo para cada aplicação. De uma forma geral, os requisitos exigidos para a escolha adequada de um extensômetro relacionam-se à faixa de deformação, tipo de carregamento, tempo de ensaio, faixa de temperatura e corrente de excitação.

Os extensômetros podem ser utilizados para medidas estáticas ou dinâmicas. A medida é considerada estática quando o tempo de permanência de um dado estado de deformação for suficientemente longo, tal que fenômenos transientes não sejam relevantes. Caso fenômenos transientes exerçam influência, a medida é considerada dinâmica. No caso de medidas dinâmicas, é importante relevar o nível de resistência à fadiga e alta sensibilidade. Medidas de longo período exigem extensômetros de baixa sensibilidade à variação de temperatura e máxima estabilidade elétrica e dimensional.

Os fabricantes de extensômetros apresentam em seus sistemas de codificação praticamente todas as informações necessárias à escolha de um dado extensômetro. Utilizando letras e números sequenciais é possível saber o material que compõe a base, o comprimento total do extensômetro, sua resistência elétrica, o coeficiente de expansão térmica, o comprimento do fio resistivo, entre outros dados.

Uma das informações mais importantes que se deve ter conhecimento no momento da escolha do extensômetro é sua sensibilidade à deformação, geralmente representada pelo símbolo K . O valor K para extensômetros elétricos de resistência mais empregados variam entre 2,0 e 2,6. Para platina chega a valores entre 4,0 e 6,0. Para o níquel, o valor de K é negativo, entre -12,0 e -20,0. Significa que uma solicitação de tração no extensômetro causa uma diminuição em sua resistência elétrica, ao contrário do que ocorre com outros materiais.

Já os materiais piezoelétricos produzem uma carga elétrica quando é sujeito a uma força ou pressão. Materiais piezoelétricos, tal como um cristal de quartzo ou uma liga policristalina de titânio-bário, contêm distribuições de cargas assimétricas. Quando uma pressão é aplicada, o cristal se deforma e ocorre um deslocamento relativo de cargas negativas e positivas dentro do próprio cristal (Holman & Gajada Jr, 1981). Este deslocamento de cargas internas produz cargas externas de sinal oposto na superfície do cristal que gera, por sua vez, uma tensão de saída nos terminais.



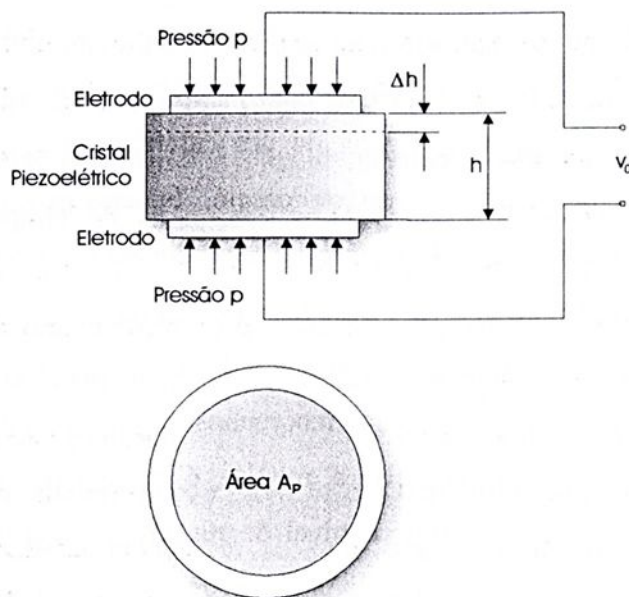


Figura 2.14 - Deformação de um cristal piezoelétrico devido à pressão aplicada.

(Fonte: Dally et al., 1993)

Muitos cristais piezoelétricos são fabricados considerando um único cristal de quartzo, porque é um dos materiais piezoelétricos mais estáveis. Suas propriedades são: módulo de elasticidade, 86GPa; resistividade, $10^{12}\Omega\text{m}$ e constante dielétrica, 40,6pF/m. Os cristais piezoelétricos exibem excelentes propriedades a altas temperaturas e podem ser operados acima de 550°C. A sensibilidade de carga do quartzo é baixa quando comparada com a do titânio-bário, no entanto, com ganhos altos obtidos por amplificadores, sensibilidades mais baixas não tornam-se uma desvantagem séria.

A liga titânio-bário é um material policristalino que pode ser polarizado aplicando-se uma alta tensão nos eletrodos, enquanto o material se encontrar a uma temperatura acima do ponto de cura (125°C). O campo elétrico alinha os domínios ferroelétricos na liga tornando-a piezoelétrica. Se uma voltagem é mantida enquanto o material é resfriado bem abaixo do ponto de cura, as características piezoelétricas tornam-se permanentes e estáveis.

A estabilidade mecânica do bário é excelente. Ele exibe grandes alongamentos e tem um módulo de elasticidade elevado, da ordem de 120GPa. É mais econômico que o quartzo e pode ser fabricado em uma variedade considerável de tamanhos e formas. Embora sua aplicação em transdutores perde apenas para o quartzo, é freqüentemente usado em equipamentos ultra-sônicos. Para este tipo de aplicação, a tensão é aplicada nos eletrodos e a liga titânio-bário se deforma liberando energia para prover a medição.

Muitos transdutores exibem uma impedância de saída relativamente baixa, na faixa de 100 a 1000 Ω . Quando os cristais piezoelétricos são usados como elementos sensores nos transdutores, a impedância de saída costuma ser alta. Claramente, as faixas de impedância são extremamente altas, podendo ser reduzidas, em casos de carregamento monotônico, para até cerca de 10k Ω , com aplicações em frequências bastante elevadas. Com essa impedância excessivamente alta, um cuidado deve ser exercido no monitoramento do nível de tensão de saída, senão, sérios erros poderão ocorrer.

Constantes de tempo de resposta dos transdutores piezoelétricos operando na faixa de 1000 a 100.000s podem ser obtidas com sensores de quartzo e amplificadores de carga. Estas constantes de tempo são suficientes para promover medições de quantidades que variam pouco com o tempo ou medidas de quantidades quase estáticas para curtos períodos de tempo.

A resposta dinâmica inerente ao sensor piezoelétrico também pode ser muito alta, pois a frequência de ressonância do pequeno elemento cilíndrico piezoelétrico é muito grande. A frequência de ressonância do transdutor depende do projeto mecânico do próprio transdutor, de sua massa e rigidez. Portanto, a vantagem mais significativa dos sensores piezoelétricos se baseia na sua alta frequência de resposta.

2.5 Ensaio Charpy Instrumentado

A instrumentação adicional aplicada à máquina de ensaio Charpy permite o monitoramento da resposta força vs tempo da deformação e fratura do corpo de prova Charpy-V. A vantagem da instrumentação do ensaio Charpy baseia-se no aumento do número de informações obtidas com um baixo custo, facilidade de execução dos corpos de prova e operação simples. A forma de instrumentação mais comumente utilizada é a aplicação de extensômetros elétricos no martelo pendular, o qual funciona como elemento sensível do comportamento força vs tempo do corpo de prova testado.

A Figura 2.15 ilustra esquematicamente o comportamento das curvas força vs tempo como função da temperatura para um aço de média resistência. Como mostrado na figura, a instrumentação permite identificar os vários estágios no processo de fratura. O valor da energia W_M é associado à área sob a curva força vs tempo até o carregamento máximo P_M . Este valor de impulso é convertido em energia aplicando a lei do movimento de Newton, que considera a velocidade do pêndulo decrescente durante o processo de deformação e fratura. Esta velocidade

decrecente é proporcional à força instantânea aplicada no corpo de prova em qualquer tempo particular t_i (Hertzberg, 1995). A energia absorvida é portanto,

$$\Delta E = E_a \left[1 - \left(\frac{E_a}{4E_0} \right) \right] \quad (2.6)$$

onde E_0 é a energia cinética total do pêndulo $\left(\frac{1}{2} m V_0^2 \right)$ e

$$E_a = V_0 \int_0^{t_i} P dt \quad (2.7)$$

onde V_0 é a velocidade inicial de impacto e m é a massa do martelo pendular. A possibilidade de separar a energia total absorvida em componentes distintas aumenta o número de informações obtidas por meio da instrumentação. As curvas força-tempo-temperatura ilustram os estágios de fratura.

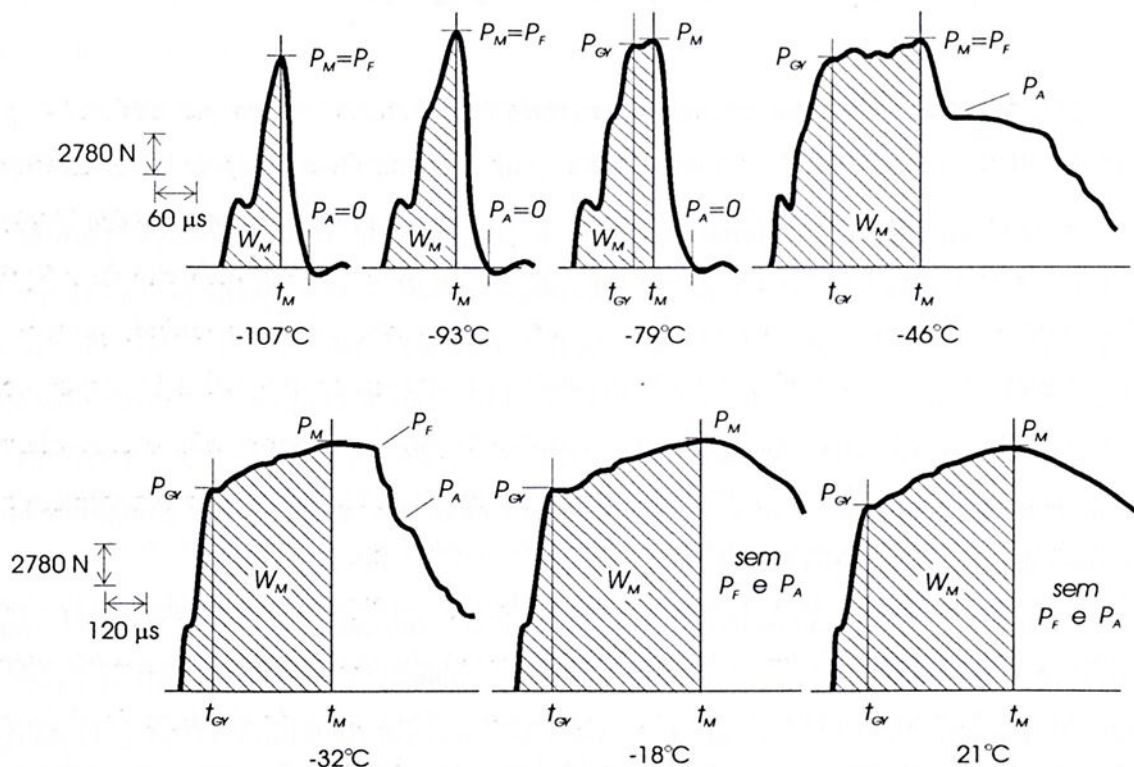


Figura 2.15 - Resposta força vs tempo para um aço de média resistência mecânica.

(Fonte: Shockey, 1995)

Uma das razões primárias para o desenvolvimento do ensaio Charpy instrumentado foi aplicar as teorias de flexão monotônica ao ensaio de impacto Charpy com flexão dinâmica em três pontos. Estudos iniciais concentraram-se na ampla faixa do comportamento mecânico, isto é, do patamar inferior, passando pela faixa de transição, até o patamar superior da curva Energia vs Temperatura. Quase todos os estudos realizados até o momento foram efetuados em aços estruturais considerando o efeito da composição química, da taxa de carregamento e da temperatura dos corpos de prova.

A inclusão de diferentes tipos de corpos de prova, variações na técnica de ensaio e testes de diversos materiais, tais como plásticos, compósitos, cerâmicos e materiais aeroespaciais, norteiam o interesse pelo ensaio de impacto instrumentado. Sua normatização definitiva tem sido alvo dos pesquisadores que atuam nesta área. Diversos procedimentos foram propostos convergindo para a norma ISO 14.556 da *International Standardization Organization*, que estabelece a metodologia e os requisitos mínimos aceitáveis para a adequada instrumentação (International Standard, 2000).

2.5.1 Condições para Instrumentação do Ensaio

A máquina de impacto e o pacote de instrumentação devem ser calibrados para assegurar resultados confiáveis. A calibração da máquina de ensaio Charpy pode ser executada em concordância com a norma da *American Society for Testing and Materials*, ASTM E-23, ou pela norma ISO 148-1, as quais especificam a metodologia de ensaio e a inspeção da máquina. Para assegurar valores corretos de energia obtidos no mostrador da máquina, podem ser utilizadas as normas ASTM E-1236/91 ou ISO 148-2 que estabelecem a verificação e qualificam a máquina de ensaio Charpy. Esses valores de energia global medidos pelo ensaio clássico apresentam um papel essencial no processo de instrumentação, pois servem como parâmetros de referência para o cálculo da energia obtida da curva força vs tempo.

A especificação ou calibração do sistema de medida depende do procedimento seguido. Segundo as recomendações da *American Society for Metals* - ASM, deve-se efetuar uma calibração específica da base de tempo, medindo-se a frequência de resposta do sistema, e da célula de carga, testando corpos de prova de alumínio 6061-T651 que são ligeiramente sensíveis à taxa de carregamento sobre a faixa utilizada.



A célula de carga é calibrada quando a força máxima dinâmica medida for apenas ligeiramente maior que a força máxima quase estática pré determinada (medida utilizando o mesmo arranjo experimental) e quando a energia obtida do mostrador da máquina de ensaio Charpy convencional se relacionar à energia total integrada abaixo da curva força vs tempo, considerando a velocidade inicial do pêndulo e as devidas correções. A relação utilizada para se obter a energia total absorvida ΔE com base na área sob a curva força vs tempo é dada pelas Equações 2.6 e 2.7.

O valor calculado ΔE será relacionado à energia obtida no mostrador da máquina apenas quando o sistema estiver calibrado ou, equivalentemente, quando a força máxima for verificada. A força máxima do alumínio é razoavelmente baixa, cerca de 7,1kN, e uma averiguação da linearidade da célula de carga para valores de força mais elevados também se faz necessária. Para efetuar este procedimento, também pode-se checar a relação entre a energia calculada e a medida diretamente pela máquina utilizando corpos de prova de aço 4340 temperados e revenidos, apresentando dureza de cerca de 52HRC e uma força de fratura próxima de 27kN.

A freqüência de resposta do sistema é determinada experimentalmente sobrepondo um sinal senoidal de amplitude constante na saída do circuito de extensômetros elétricos em ponte. A amplitude de pico a pico do sinal deve corresponder, aproximadamente, à metade da capacidade total do fundo de escala do transdutor de força a uma freqüência suficientemente baixa para assegurar atenuação nula do sinal. A freqüência da onda senoidal é então acrescida até que sua amplitude seja atenuada em 10% (0,915dB). O tempo de resposta T_R é calculado segundo Ireland (1974):

$$T_R = \frac{0,35}{f_{0,915}} \quad (2.8)$$

onde $f_{0,915}$ é a freqüência a 0,915dB (10% de atenuação).



2.5.2 Especificação e Calibração do Sistema de Medida segundo a ASM

O instituto internacional de soldagem tentou, primeiramente, normatizar o teste de impacto Charpy instrumentado, mas concluiu que o ensaio não era suficientemente documentado e o trabalho foi interrompido. Poucos anos depois, dois eventos significativos incitaram sérias considerações sobre a normatização: a criação de dados para a tenacidade à fratura dinâmica pelo comitê de pesquisas de vasos de pressão e a formação de um grupo da ASTM E-24.03.04, que incentivou a normatização do ensaio Charpy com corpos de prova pré trincados.

O comitê de pesquisas de vasos de pressão e um conselho de propriedades mecânicas com ênfase em tenacidade à fratura de componentes nucleares desenvolveram alguns procedimentos para medir valores de tenacidade à fratura dinâmica, K_{I_d} , considerando corpos de prova Charpy pré trincados. Além disso, o *Electric Power Research Institute - EPRI* - efetuou um trabalho no sentido de desenvolver os procedimentos denominados EPRI. Atualmente, existem apenas diferenças sutis entre os dois conjuntos de procedimentos. Os requerimentos de testes descritos abaixo foram estabelecidos e atualizados pelo próprio instituto.

O sinal da força medido durante o ensaio de impacto, utilizando o martelo como elemento transdutor, oscila sobre a força atual requerida para deformar o corpo de prova. Portanto, da análise do procedimento empregado na aquisição do sinal, deve-se minimizar o desvio da força aparente da atual força para causar a deformação e fratura do corpo de prova. A Figura 2.16 ilustra esquematicamente o fenômeno das oscilações.

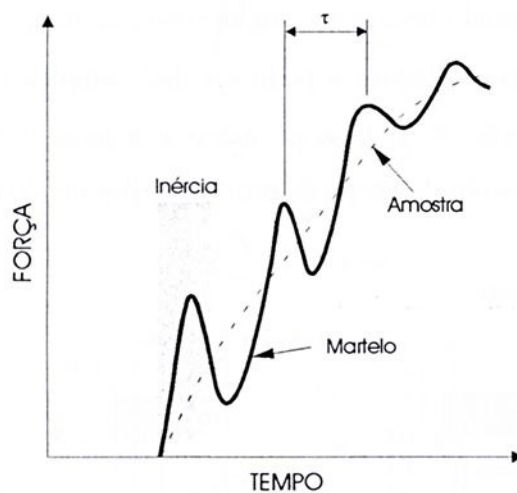


Figura 2.16 - Comparação entre o sinal medido e o sinal esperado.

(Fonte: Ireland, 1974)

A amplitude dessas oscilações inerciais intrínsecas ao processo de impacto define-se por uma relação que envolve as impedâncias acústicas do martelo pendular e do corpo de prova, bem como da velocidade inicial de impacto, conforme mostra a Equação 2.9 a seguir.

$$P_i \propto \frac{Z_m \cdot Z_c}{Z_m + Z_c} V_0 \quad (2.9)$$

onde Z_c e Z_m são as impedâncias acústicas do corpo de prova e do martelo respectivamente.

Segundo Ireland (1977), o sinal obtido pelos extensômetros posicionados no martelo pendular é uma combinação bastante complexa das seguintes componentes:

- i. verdadeira resposta do corpo de prova diante da solicitação de impacto;
- ii. forças inerciais sofridas pela célula de carga provenientes da aceleração do corpo de prova;
- iii. flutuações de baixa frequência provenientes das ondas de tensões refletidas;
- iv. ruídos de alta frequência causados pelo sistema eletrônico de amplificação, na ausência de filtros.

Uma visualização do evento do impacto permite especificar três grandes pontos relevantes do teste: força inercial, limitação da frequência de resposta e o ajuste eletrônico da curva. A força de impacto, como já visto, promove oscilações na força de contato entre o corpo de prova e o martelo pendular, sendo necessário um intervalo de tempo entre 2τ e 3τ para a força ser dissipada. τ é o período das oscilações e pode ser dado empiricamente pela Equação 2.10 para uma razão de 4 entre o vão S da base de apoio e a largura W do corpo de prova. A Figura 2.17 ilustra o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio.

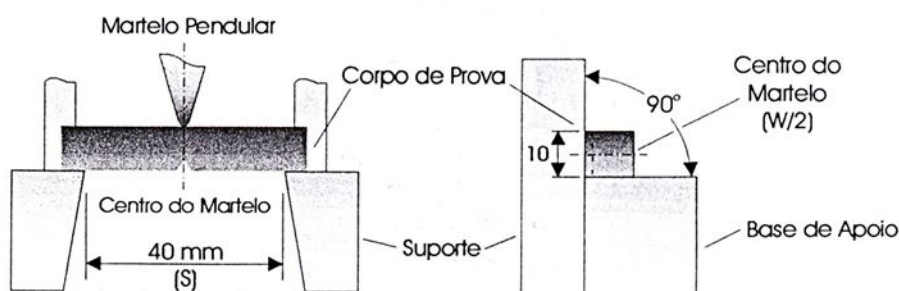


Figura 2.17 - Posicionamento do corpo de prova Charpy na base de apoio da máquina.

(Fonte: Shockey, 1995)

$$\tau = 3,36 \left(\frac{W}{S_0} \right) [EBC_s]^{\frac{1}{2}} \tag{2.10}$$

onde B é a espessura do corpo de prova, E é o módulo de Elasticidade Longitudinal, S₀ é a velocidade do som no corpo de prova e C_s é a compliância do corpo de prova. Assim, τ tem um valor típico de 30μs para corpos de prova Charpy de aço¹. Quando o tempo t é menor que 2τ, não é possível usar o sinal no martelo para medir a porção da força do corpo de prova causada pelos efeitos inerciais. Uma especificação empírica para a avaliação segura da força e do tempo é:

$$t \geq 3\tau \tag{2.11}$$

O controle do tempo t é conseguido pelo controle da velocidade inicial de impacto V₀. A constante 3 na equação acima pode ser tão baixa quanto 2,3 sem afetar grandemente os resultados, se a técnica do ajuste da curva descrita abaixo for devidamente seguida. O valor 3 foi escolhido para o caso de uma alta frequência de resposta. Um exemplo da influência da velocidade inicial de impacto nas amplitudes das oscilações inerciais é mostrado na Figura 2.18.

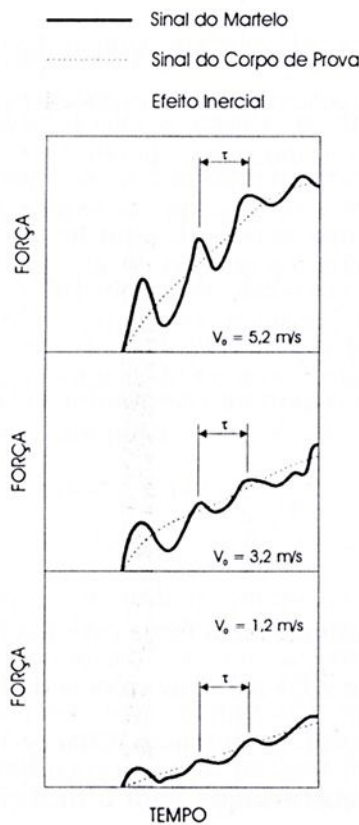


Figura 2.18 - Controle da amplitude das oscilações inerciais pela velocidade de impacto V₀. (Fonte: Quinan, 1996)

¹ τ não depende apenas do material, mas também da profundidade a do entalhe, da largura W do corpo de prova e do vão S da base de apoio.



Os procedimentos originais EPRI relacionaram o fator 2,3 e incluíram um filtro seletivo para o ajuste da curva. Simulações computacionais do ensaio Charpy instrumentado têm validado o valor de τ e o critério de 3τ . O problema potencial da frequência de resposta do condicionador e amplificador de sinais é evitado especificando-se

$$t \geq 1,1T_R \quad (2.12)$$

onde T_R é definido como o tempo de resposta da instrumentação a uma atenuação da amplitude do sinal igual a 0,915dB, tal como indicado na Equação 2.8. Tempos de resposta inadequados resultam em sinais distorcidos. O ajuste das oscilações é alcançado especificando um T_R mínimo. A amplitude das oscilações observadas é portanto reduzida, de modo que a disparidade entre força de contato e a força devida à deformação e fratura do corpo de prova seja mínima. Para melhores resultados, determinou-se empiricamente que

$$T_R \geq 1,4\tau \quad (2.13)$$

é adequado para o ajuste eletrônico sem que ocorra a alteração global na curva, quando $t < 3\tau$. Quando $t \geq 3\tau$, não há necessidade de se ajustar a curva, pois a disparidade entre a força de contato e a força de deformação do corpo de prova é menor que cerca de 5%. Os requerimentos para se obter uma curva força vs tempo aceitável, com tempo de impacto adequado tal como ilustra a Equação 2.11, resulta na necessidade de controlar V_0 , como foi visto. Controlando a velocidade de impacto, o controle correspondente de E_0 é inerente. A redução da velocidade do martelo durante a força de impacto deve portanto ser minimizada, ou seja:

$$E_0 \geq 3W_M \quad (2.14)$$

onde W_M é a energia dissipada pelo sistema até a força máxima P_M . Esta condição assegura que a velocidade não seja reduzida mais que 20% até a ocorrência da força máxima. Este requerimento raramente é um problema para ensaios de impacto Charpy-V utilizando o fundo de escala completo da máquina. Assim, os requerimentos para a medição aceitável da força segundo a ASM são resumidos como segue.

Efeitos inerciais	$t \geq 3\tau$
Limitação da frequência de resposta	$t \geq 1,1T_R$, requerido apenas se $2,3\tau \leq t < 3\tau$
Ajuste eletrônico da curva	$T_R \geq 1,4\tau$
Critério da energia	$E_0 \geq 3W_M$

O tempo t corresponde ao tempo mais curto possível requerido depois que o corpo de prova sofreu o impacto, isto é, t é o tempo do início do sinal até o tempo correspondente à força máxima, t_M , para o caso de fratura elástica, e t é o tempo do início do sinal até o tempo correspondente à força do escoamento generalizado, t_{GY} , para o caso de fratura com escoamento generalizado, conforme mostra esquematicamente a Figura 2.15. A especificação para o ajuste eletrônico da curva é apenas requerida se $2,3\tau \leq t < 3\tau$.

2.5.3 Especificação e Calibração do Sistema de Medida segundo a ISO

De acordo com os procedimentos estabelecidos pela ISO, a medida da força pode ser obtida utilizando-se dois extensômetros elétricos de resistência posicionados no martelo pendular para formar o transdutor de força. Na realidade, o circuito resistivo completo é formado por uma ponte de *Wheatstone*. Dois extensômetros são ativos e os outros dois são passivos. Estes últimos devem ser fixados numa peça constituída do mesmo material do martelo pendular e isenta dos efeitos de vibração causados pelo ensaio. Qualquer outra forma de instrumentação pode ser aceita, desde que as características dinâmicas do sistema completo sejam mantidas.

A cadeia de medição completa, isto é, o conjunto composto pelo martelo instrumentado, pelo amplificador dinâmico e pelo sistema de gravação do sinal, deve ter uma frequência de resposta de, pelo menos, 100kHz, com um tempo de subida correspondente não maior que 3,5 μ s. A avaliação dinâmica de todo o sistema, portanto, é considerada satisfatória se um corpo de prova constituído de aço apresentar um pico maior que 8kN, para uma velocidade de impacto entre 5 e 5,5m/s. Diversos experimentos têm mostrado que as forças nominais de impacto para corpos de prova constituídos de todos os tipos de aço encontram-se na faixa de 10 a 40kN.

A calibração da força pode ser realizada estaticamente aplicando-se uma força conhecida no martelo instrumentado, devidamente montado num aparato que represente as



mesmas condições do ensaio. Para tanto, são recomendados construções de dispositivos de apoio e fixação do martelo com características próprios, tais como rigidez e rigor dimensional e tolerâncias de forma adequados.

Por se tratar de um sinal transiente, o sistema de gravação da curva força vs tempo preferível é um gravador com armazenagem digital, contendo interface eletrônica para tratamento dos dados via microcomputador e conversor analógico-digital de no mínimo 8 bit, com uma taxa de amostragem de 250kHz. Um sistema de gravação de 12 bit ou um gravador com capacidade de armazenamento de 2000 pontos do sinal num tempo de 8ms também são considerados adequados para a aquisição.

Recomenda-se que a máquina de ensaio Charpy e o sistema de medida sejam calibrados em intervalos que não excedam 12 meses ou sempre que os equipamentos forem desmontados, movidos ou reparados. Se o deslocamento do martelo pendular não puder ser medido diretamente no ensaio, é possível determinar a curva força vs deslocamento equivalente. A relação força vs tempo é proporcional à aceleração característica ocorrida no ensaio. Assumindo o pêndulo como um elemento suficientemente rígido de massa m , o deslocamento é obtido numericamente da seguinte forma:

$$v(t) = V_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \quad (2.15)$$

e

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (2.16)$$

onde V_0 é a velocidade de impacto no momento em que o martelo atinge o corpo de prova e t_0 é o tempo para o início da deformação do corpo de prova.

A violação de qualquer um dos procedimentos gerais apresentados acima invalidarão os dados obtidos do ensaio de impacto Charpy instrumentado, segundo a normalização da ISO. A instrumentação permite separar duas componentes de energia e medir a força aplicada por todo o evento da fratura, mas não é possível a determinação direta da componente responsável pela iniciação da trinca para casos dúcteis.

A avaliação das curvas força vs deslocamento para a determinação das forças utilizadas nos cálculos da tenacidade é feita considerando-se a classificação dos diversos formatos dos sinais, enquadrados pela própria ISO como do tipo A ao F. Os tipos A e B indicam

que a energia do material ensaiado encontra-se no patamar inferior da curva de transição dúctil-frágil do ensaio Charpy clássico. As curvas do tipo C, D e E indicam que a energia encontra-se na região de transição. Finalmente, na curva do tipo F, a energia localiza-se no patamar superior.

Nas curvas do tipo A, ocorre apenas a propagação instável da trinca. Para os tipos B, C, D e E, podem ocorrer as propagações estáveis e instáveis da trinca. Com as curvas do tipo F, apenas a propagação estável da trinca acontece. A Figura 2.19 mostra a classificação ISO.

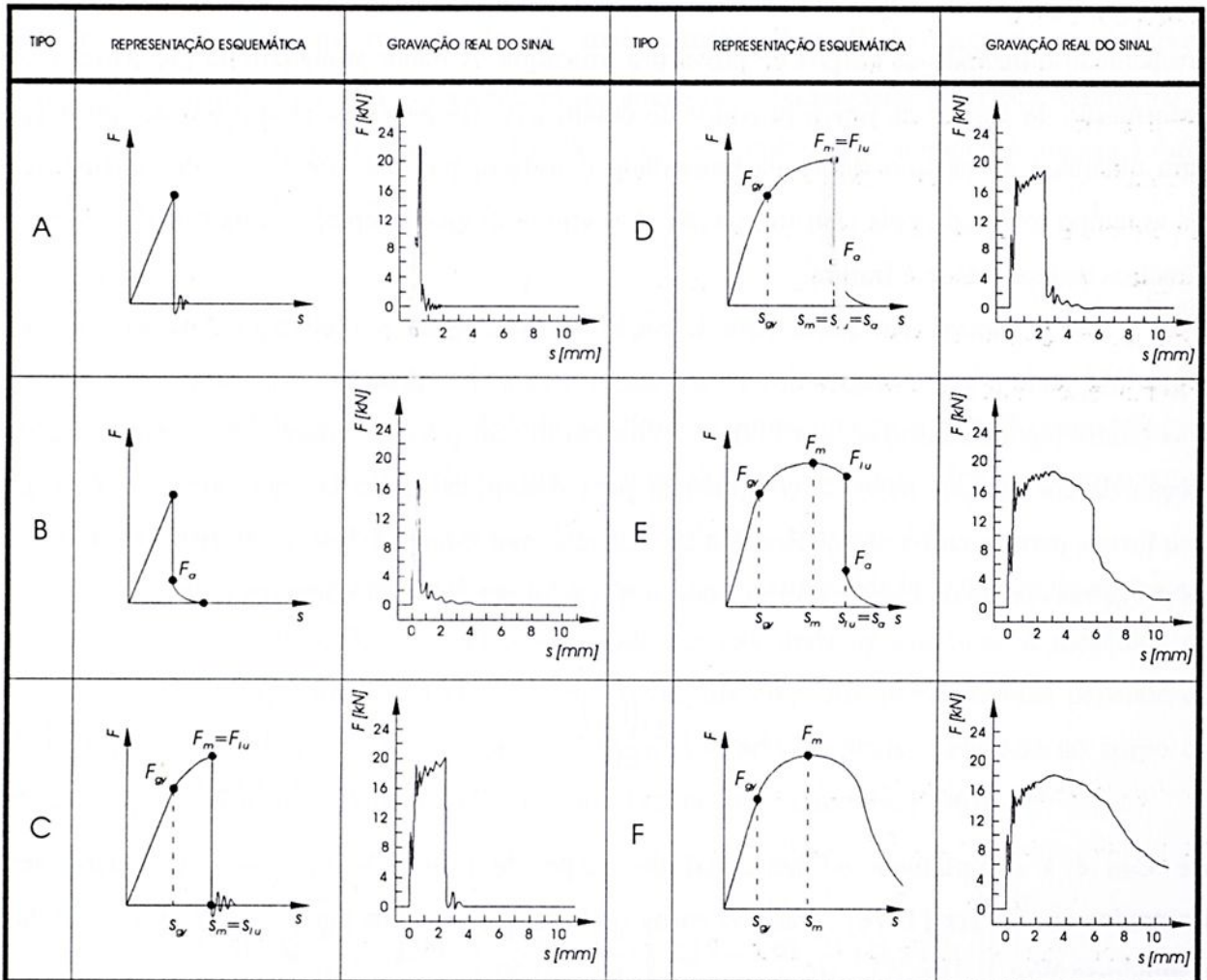


Figura 2.19 - Curvas características força vs deslocamento classificadas pela norma ISO.

(Fonte: International Standard, 2000)

Observa-se que a normalização ISO traz consigo maior simplicidade e objetividade quanto à especificação dos equipamentos e do sistema de medida, assim como quanto ao estabelecimento dos procedimentos de ensaio quando se compara com as recomendações propostas pela ASM, formuladas há mais tempo. Entretanto, as formulações necessárias para a



determinação da tenacidade à fratura dinâmica não são abordadas em seu conteúdo, sendo apenas apresentados critérios para o cálculo das proporções da superfície de fratura dúctil, ainda que as formulações são particulares para certos tipos de materiais metálicos, tais como os utilizados em vasos de pressão.

2.5.4 Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica

A propriedade da tenacidade à fratura dinâmica pode ser obtida do ensaio Charpy instrumentado utilizando-se corpos de prova pré trincados. A maior vantagem da pré trinca é a transformação de corpos de prova providos de entalhes V em peças de ensaio da mecânica da fratura dinâmica. O cálculo direto da tenacidade à fratura, portanto, baseia-se na informação força vs tempo fornecida pela instrumentação. A seguinte discussão apresenta os cálculos desses parâmetros de tenacidade à fratura.

Se a fratura tem início com a força máxima, como por clivagem, os valores de energia W_M podem ser considerados como uma energia de iniciação. Entretanto, W_M inclui outras contribuições causadas pela deflexão dos corpos de prova. Portanto, é necessária uma correção da energia por meio da compliância para determinar o verdadeiro valor da energia. Dessa forma, para os casos nos quais a fratura ocorre com a força máxima, conforme mostram as duas primeiras curvas da Figura 2.15, o valor de E_M pode ser calculado diretamente:

$$E_M = \frac{C_{ND} (P_M)^2}{2EB} \quad (2.17)$$

onde C_{ND} é a compliância adimensional do corpo de prova. Valores típicos podem ser encontrados em Server (1978)¹. Para os casos onde há escoamento generalizado, E_M é obtida corrigindo-se W_M :

$$E_M = W_M - \left\{ \left(\frac{P_M^2}{2} \right) \left[C_T - \left(\frac{C_{ND}}{EB} \right) \right] \right\} \quad (2.18)$$

¹ Os valores de compliância dependem da profundidade a do entalhe, da largura W do corpo de prova e do vão S da base de apoio.



onde C_T é a compliância total do sistema, calculada no escoamento generalizado e corrigida devido ao decréscimo da velocidade:

$$C_T = \left(\frac{V_0 t_{GY}}{P_{GY}} \right) - \left(\frac{V_0^2 t_{GY}^2}{8E_0} \right) \quad (2.19)$$

Esta correção da compliância é assumida ser linear com o carregamento, mas a correção atual não é tão simples. Entretanto, admitida uma relação linear, o erro resulta num valor de E_M ligeiramente menor, isto é, mais conservativo. É freqüentemente desejável particionar a energia total em componentes de iniciação e propagação da trinca, conforme já mencionado anteriormente (Meyers & Chawla, 1982). Assumindo que a iniciação ocorra à força máxima, a energia de propagação E_P é:

$$E_P = E_T - E_M \quad (2.20)$$

onde E_T é a energia total de fratura, obtida no mostrador da máquina de ensaio, determinada pela multiplicação entre o peso do martelo e a diferença de altura antes e após o impacto com o corpo de prova, ou ainda pela variação de energia ΔE , fornecida pela Equação 2.6.

Quando a fratura se dá devido à força máxima, a tenacidade à fratura dinâmica em deformação plana, dada pelo parâmetro K_{Id} , pode ser calculada aplicando-se a mecânica da fratura linear elástica, norma ASTM E399-90. A fórmula empírica de recorrência depende da geometria de corpo de prova e do ensaio utilizado. A expressão abaixo refere-se ao corpo de prova Charpy pré trincado (American Society for Testing and Materials, 1996).

$$K_{Id} = \frac{3P_M S \left(\frac{a}{W} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1,99 - \left(\frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \frac{a^2}{W^2} \right) \right\}}{BW^{\frac{3}{2}} \left[2 \left(1 + \frac{2a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{\frac{3}{2}} \right]} \quad (2.21)$$

onde P_M é a força máxima que o corpo de prova foi capaz de suportar, a é o comprimento da trinca, W é a largura e B é a espessura do corpo de prova. Portanto, se o escoamento

generalizado não ocorrer, um valor elástico linear dinâmico de tenacidade à fratura, K_{Id} , pode ser calculado. A taxa de intensidade de tensão \dot{K} é determinada por:

$$\dot{K} = \frac{K_{Id}}{t_M} \quad (2.22)$$

onde t_M é o tempo para a ocorrência da força máxima. Esta taxa de carregamento reflete o aspecto dinâmico do próprio carregamento, pois o valor mais baixo de \dot{K} para corpos de prova Charpy pré trincados é da ordem de $11 \times 10^4 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} \cdot \text{s}^{-1}$.

Quando ocorre o escoamento generalizado, pode ser considerado um valor da energia baseado na integral J para se obter a medida da tenacidade à fratura dinâmica. O cálculo da tenacidade à fratura dúctil dinâmica, J_{Id} , é incerto sobre o ponto de iniciação da fratura conhecido na curva força vs tempo. Para a fratura iniciada por clivagem, este ponto geralmente corresponde à força máxima. Entretanto, para a iniciação dúctil, a força máxima é geralmente uma hipótese não conservativa. Quando o ponto de iniciação é conhecido ou é determinado experimentalmente e quando $a/W \geq 0,5$, então:

$$J_{Id} = \frac{2E_M}{Bb} \quad (2.23)$$

onde b é o comprimento ($W-a$). A tenacidade à fratura dinâmica em condições elasto-plásticas pode, portanto, ser obtida considerando o valor J_{Id} como:

$$K_{Jd} = (EJ_{Id})^{1/2} \quad (2.24)$$

A taxa de intensidade de tensão \dot{K} também pode ser calculada, como na Equação 2.22, tomando-se por base o valor K_{Jd} .

$$\dot{K} = \frac{K_{Jd}}{t_M} \quad (2.25)$$

onde t_M , nesse caso, é o tempo para a ocorrência do escoamento generalizado.



Materiais e Métodos

3.1 Materiais

Os materiais metálicos que constituíram todos os corpos de prova são apresentados neste item. É fundamental mencionar aqui que a fase experimental foi dividida em duas etapas distintas. A primeira representou uma fase de contato incipiente e, ao mesmo tempo, indispensável. O principal propósito foi experimentar um reconhecimento do processo de instrumentação, manuseio dos equipamentos eletrônicos e prática de ensaio.

Sendo assim, essa etapa foi toda desenvolvida utilizando o martelo pendular como célula de carga e o medidor de deformação e deslocamento como condicionador de sinais, a uma frequência de corte de, aproximadamente, 5Hz. Sabe-se que este valor é extremamente pequeno para esta aplicação e esse fato será discutido no Capítulo 5.

A segunda etapa foi baseada na implementação de transdutores específicos para forças de impacto, fixos na base de apoio dos corpos de prova, conectados a condicionadores de 100kHz. Nesta etapa, os ensaios foram conduzidos de forma simultânea para que uma comparação dos sinais medidos pudesse ser realizada. Porém, utilizou-se o medidor de deformação e deslocamento com frequência de corte igual a 1kHz em conjunto com o martelo instrumentado por extensômetros elétricos de resistência. Ressalta-se que os equipamentos serão melhor especificados nos itens 3.2.2 e 3.3.2.

Os materiais obrigatoriamente acompanharam esse desenvolvimento por etapas. Embora a escolha possa demonstrar certa aleatoriedade, cada etapa mereceu certo tipo de material como corpo de prova, uma vez que diferentes instrumentações foram adotadas em cada uma delas. Em geral, a grande meta baseou-se na busca pela compreensão e entendimento dos diferentes sistemas de medida utilizados e, por isso, a variação microestrutural ou a escolha de

distintos materiais, que constituíram os corpos de prova, se mostrou como variável orientadora dos resultados obtidos, além da variação da velocidade de impacto do martelo pendular.

Portanto, na primeira etapa, escolheu-se três tipos de materiais metálicos distintos: aço SAE 1020, 1040 e aço de qualidade aeronáutica 300M, caracterizado por apresentar alta resistência mecânica. 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, o que permitiu uma melhor avaliação do sistema de medida adotado.

Com o propósito de caracterizar os materiais ensaiados com base em suas propriedades mecânicas, efetuou-se os ensaios apresentados abaixo segundo as respectivas normalizações. Assim, as medidas de dureza Vickers, limite de resistência e energia absorvida no ensaio Charpy convencional, entre outras propriedades, são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Caracterização mecânica dos materiais ensaiados na etapa 1¹.

Material	Dureza Vickers [HV]	Limite de Resistência [MPa]	Energia Absorvida [J]	Ductilidade [%]	Força Máxima* [kN]	Tenacidade à Fratura Aparente* [MPa.m ^{1/2}]
Aço SAE 1020	132	386	228	76	12,5	58,7
Aço SAE 1040	272	598	18	53	13,0	61,1
Aço 300M	228	730	34	62	17,6	82,7

* Ensaio de flexão monoaxial em corpos de prova com entalhe arredondado ($r=0,25\text{mm}$). A tenacidade à fratura foi calculada com base na ASTM E399-90. O termo aparente refere-se à utilização de corpos de prova com entalhe arredondado, sem a pré-trinca de fadiga.

De modo similar à primeira etapa, corpos de prova constituídos de aço 8640 e da liga de alumínio 7050, ambos na condição como fornecidos, foram utilizados na etapa 2. Dessa maneira, adicionou-se dois novos materiais para a efetivação dos ensaios finais, além dos existentes na etapa 1 para melhor comparar as arquiteturas de medição.

Todavia, o aço 1020 não foi ensaiado nesta etapa por apresentar ductilidade excessiva em relação aos demais materiais e causar níveis de desgaste, mesmo incipientes, na superfície de contato do transdutor de força. Em muitos casos, as amostras não apresentaram fratura completa e o desgaste vinha sendo potencializado. Esse acontecimento será melhor discutido no Capítulo 5. Sendo assim, os seguintes materiais foram utilizados na etapa 2: aços SAE 1040, 300M, 8640 e o alumínio 7050. Cabe enfatizar que os aços 1040 e 300M eram amostras remanescentes da etapa 1 que pertenciam ao mesmo lote e às mesmas condições de fabricação. A Tabela 3.2 mostra uma breve caracterização mecânica dos novos materiais.

¹ O cálculo das incertezas dos resultados encontra-se no Apêndice C.



Tabela 3.2 - Caracterização mecânica dos materiais ensaiados na etapa 2¹.

Material	Energia Absorvida [J]	Força Máxima* [kN]	Tenacidade à Fratura Aparente* [MPa.m ^{1/2}]
Aço SAE 8640	14	20,7	97,3
Liga Al 7050	16	9,5	44,6

* Ensaio de flexão monotônico em corpos de prova com entalhe arredondado ($r=0,25\text{mm}$). A tenacidade à fratura foi calculada com base na ASTM E399-90. O termo aparente refere-se à utilização de corpos de prova com entalhe arredondado, sem a pré trinca de fadiga.

A busca pela comparação dos sinais força vs tempo provenientes de distintos materiais também foi o principal foco desta etapa 2. Por isso, a inserção do aço 8640 e da liga de alumínio 7050 foi importante e necessária. Foi implantado um controle da retirada de todos os corpos de prova do material bruto, bem como do posicionamento do entalhe. Especificamente nos corpos de prova de alumínio, por terem sido laminados, os entalhes foram usinados segundo a direção L-T na tentativa de se alcançar maior repetibilidade dos resultados. Esse fato será melhor abordado no Capítulo 5.

3.2 Metodologia - Etapa 1

A metodologia experimental empregada na etapa 1 é descrita neste item. Entre outros tópicos, serão abordados e detalhados os procedimentos adotados na instrumentação do martelo pendular, na avaliação do comportamento da célula de carga, no levantamento de sua curva de calibração e no ensaio Charpy instrumentado. Os equipamentos utilizados para a efetivação do ensaio Charpy instrumentado, desde o ensaio para avaliar a performance da célula de carga, até o ensaio objeto de todo o estudo, também são mostrados nos itens subseqüentes.

3.2.1 Descrição da Instalação Experimental

O sistema de medida, basicamente, compreendeu-se no transdutor de força, no condicionador de sinais, no osciloscópio digital e no microcomputador. A Figura 3.1 ilustra de maneira esquemática a seqüência das ligações. Uma fotografia do aparato experimental fornece um panorama da montagem, como pode ser visto na Figura 3.2.

¹ O cálculo das incertezas dos resultados encontra-se no Apêndice C.



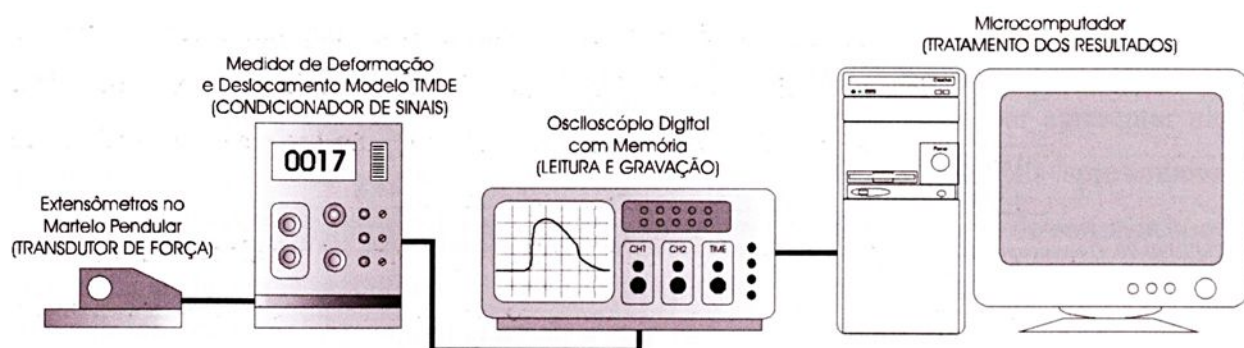


Figura 3.1 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 1 do trabalho.

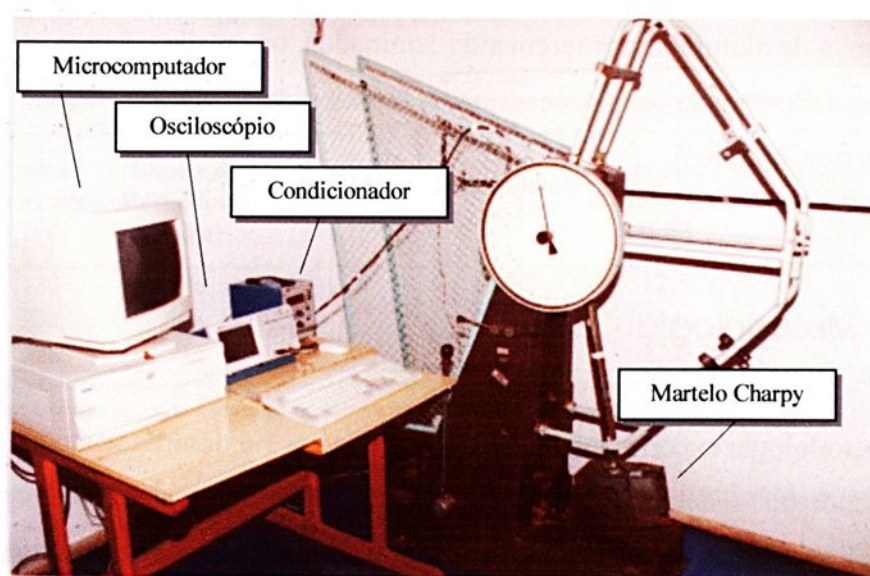


Figura 3.2 - Montagem experimental empregada na etapa 1 do trabalho.

O martelo pendular foi transformado numa célula de carga ou transdutor de força, porque transforma a natureza do sinal de entrada, isto é, de força para voltagem. Extensômetros elétricos de resistência, colados no martelo, são responsáveis por essa transformação do sinal, que é transmitido ao próximo elemento do sistema de medida, o condicionador e amplificador de sinais. Maiores detalhes do processo de instrumentação serão apresentados adiante.

O sistema de condicionamento e aquisição do sinal corresponde ao conjunto dos aparelhos eletrônicos responsáveis pela excitação, leitura, amplificação e digitalização do sinal da célula de carga. Dessa forma, os componentes deste conjunto são o condicionador da célula de carga e o osciloscópio digital.

O condicionador da célula de carga é composto por uma fonte estabilizadora para o fornecimento da tensão de entrada ao circuito de extensômetros, um amplificador para o tratamento do sinal de saída do circuito e um indicador para leitura do valor da tensão de saída. Em síntese, este equipamento faz a excitação e leitura do sinal de tensão proveniente da célula de carga, o amplifica e o deixa disponível para o sistema de aquisição.

O osciloscópio digital responde pela digitalização em alta velocidade do sinal voltagem vs tempo e o armazena em uma memória do tipo RAM. O microcomputador procede a leitura e o tratamento numérico do sinal, por meio das curvas força vs tempo.

Dos equipamentos citados, o amplificador e o osciloscópio, montados em série, são os que promovem o condicionamento e a leitura do sinal. A fonte fornece energia ao sistema e é utilizada apenas para alimentação do circuito. O osciloscópio é um equipamento de alto desempenho especialmente voltado para medidas de sinais dinâmicos. O equipamento crítico da cadeia de medição é o amplificador, que é um condicionador de sinais cuja resposta é dependente da frequência do sinal de entrada e da sua própria resposta.

3.2.2 Especificação dos Equipamentos

As principais especificações de todas as máquinas e equipamentos utilizados na etapa 1 do trabalho são mostrados na Tabela 3.3 a seguir. A prensa mecânica em conjunto com o anel dinamométrico contribuíram para execução de dois procedimentos essenciais: a avaliação da qualidade da colagem dos extensômetros elétricos posicionados no martelo pendular e a calibração estática da célula de carga.

O condicionador de sinais, o osciloscópio digital, o microcomputador e a máquina de ensaio Charpy fizeram parte propriamente do ensaio instrumentado. E, finalmente, a máquina de ensaio de tração e de medir dureza forneceram resultados da caracterização mecânica dos corpos de prova utilizados nesta etapa.



Tabela 3.3 - Equipamentos utilizados na etapa 1 do trabalho.

Equipamento	Especificações
Prensa Mecânica	Fabricante: Conteco Indústria e Comércio Ltda Marca: Pavitest Modelo: C1006 Acionamento: Manual ou Automático
Anel Dinamométrico	Fabricante: Conteco Indústria e Comércio Ltda Modelo: N785 Capacidade: 5000kgf Resolução do Relógio Comparador Acoplado: 0,001mm Curso do Relógio: 0 - 5mm
Indicador Digital de Deformação (Condicionador de Sinais)	Fabricante: Sortec - Ind. e Com. de Transdutores Ltda Modelo: TMDE Frequência de Resposta: 0 a 1kHz Sensibilidade: 0,05 a 50mV/V Tensão de Excitação do Circuito Resistivo: 1; 2,5 e 5V
Osciloscópio Digital de Tempo Real	Fabricante: Tectronix Modelo: TDS 210 Banda de Frequência: 60MHz Interface: Porta de Comunicação RS232 ou GPIB Software de Aquisição: Wavestar - versão 2.01
Microcomputador	Memória RAM: 128 Mb Processador: Pentium - 500MHz Hard Disk: 6,4Gb Interface: Porta de Comunicação RS232
Máquina de Ensaio Charpy Convencional	Fabricante: Heckert Número de Fabricação: 423/18 Ano: 1980 Capacidade padrão: 150 e 300J
Máquina de Ensaio de Tração	Fabricante: Heckert Número de Fabricação: 990.07137 Ano: 1981 Capacidade: 100.000kgf Acionamento: Manual ou Automático
Durômetro	Fabricante: Heckert Número de Fabricação: 308/77 Ano: 1981 Tipo de Medida: Dureza Brinell e Vickers
Estufa para Processos de Cura	Fabricante: FANEN Modelo: 315/6



3.2.3 Curva de Resposta do Condicionador de Sinais

A determinação da curva de resposta do condicionador de sinais se fez necessária para comprovar a verdadeira frequência de resposta que o principal equipamento do sistema de medida poderia fornecer. Conforme mencionado anteriormente, utilizou-se nesta etapa o condicionador de sinais com um filtro DC ou frequência de corte de 5Hz, valor extremamente baixo para aquisições dinâmicas, tal como a do ensaio Charpy instrumentado.

Vale lembrar que atenuações da ordem de 10% ou 0,915dB são assumidas aceitáveis para sinais provenientes do impacto Charpy. Atenuações na faixa de 30% atendem geralmente as demais medidas. Nesse caso, para a curva de resposta apresentada na Figura 3.3 abaixo, a frequência de corte passa a ser cerca de 11 Hz, valor ainda extremamente baixo.

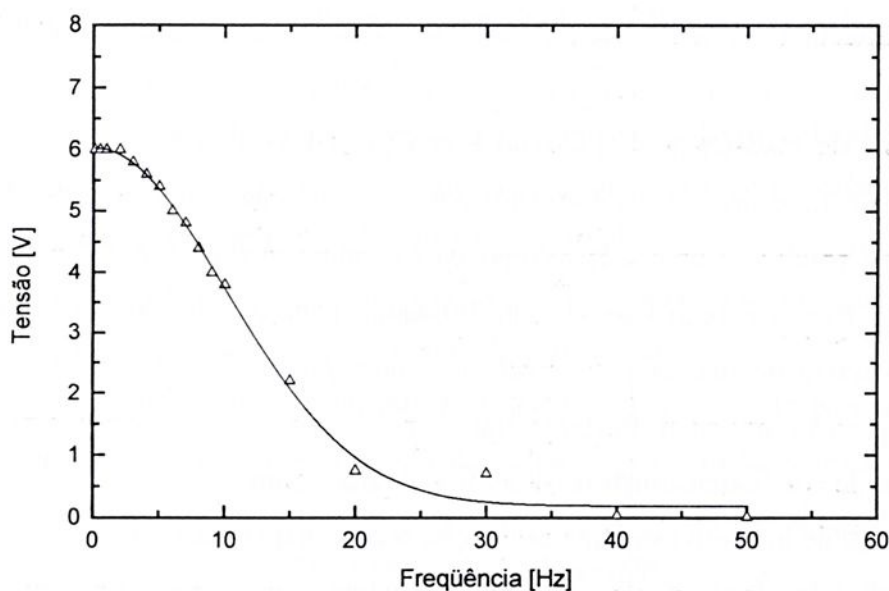


Figura 3.3 - Curva de resposta do medidor de deformação e deslocamento modelo TMDE.

O fabricante do aparelho obteve, em laboratório próprio, a curva de resposta do equipamento procedendo-se da seguinte forma. Um gerador de frequência, conectado na entrada do condicionador, aplicava sinais senoidais de várias frequências, partindo-se de um valor de frequência pequeno, de maneira que não houvesse atenuação na amplitude do sinal. O nível de voltagem era lido na saída analógica do aparelho, por meio de um multímetro digital, para cada valor incremental de frequência ao qual o condicionador estava submetido.

Cabe ressaltar que a utilização do condicionador de sinais com frequência de corte extremamente baixa foi acidental, porém contribuiu em muito para a avaliação do sistema de

medida como um todo. Após a suspeita de que o equipamento apresentava-se aquém do esperado, fornecendo valores de força de impacto muito inferiores às determinadas monotonicamente, principalmente para materiais de comportamento mais frágeis, a avaliação e manutenção do aparelho foi solicitada junto ao fabricante, que constatou a irregularidade.

Entretanto, mesmo com tamanho fato inesperado, decidiu-se manter esses resultados e divulgá-los aqui, embora errôneos, pois contribuíram mais intensamente para a compreensão do sistema de medida adotado na primeira etapa do trabalho. Após a correta manutenção, o mesmo condicionador de sinais foi utilizado para compor o sistema de medida simultaneamente à utilização dos transdutores piezoelétricos. Esse procedimento será descrito no item 3.3.5.

3.2.4 Instrumentação do Martelo Pendular

Para executar o ensaio objeto do estudo e avaliar a arquitetura de medição adotada nesta etapa, foram selecionados, como elementos sensíveis, 4 unidades de extensômetros metálicos elétricos de resistência KIOWA do tipo KFR-1-C1-11, axial de resistência elétrica igual a $120,4\Omega \pm 0,3$. Esse tipo de extensômetro apresenta algumas características desejáveis na instrumentação do pêndulo Charpy, tais como baixa mudança do fator de calibração com a temperatura, $-0,020\%/C^\circ$, e bom fator de sensibilidade, quando utilizado em células de carga compostas por materiais de alta resistência mecânica, *gage factor* K igual a $2,06 \pm 1\%$.

A aquisição do sinal fundamentou-se na instrumentação apropriada do martelo pendular, utilizando os extensômetros descritos acima, como medidores da deformação, associando-a à força de impacto mediante calibração prévia, a qual será detalhada no item 3.2.6.

A definição do local da colagem dos extensômetros foi feita observando-se as recomendações e os procedimentos adotados por Delforge (1994). Dois aspectos foram decisivos para a escolha do local de colagem: segurança contra qualquer dano durante os impactos e boa 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 os quatro extensômetros foram devidamente colados na superfície interna, formando uma ponte de *Wheatstone* e simulando o princípio físico de um anel dinamométrico. A Figura 3.4 mostra em detalhe a alteração geométrica do martelo pendular e os extensômetros devidamente colados e protegidos.



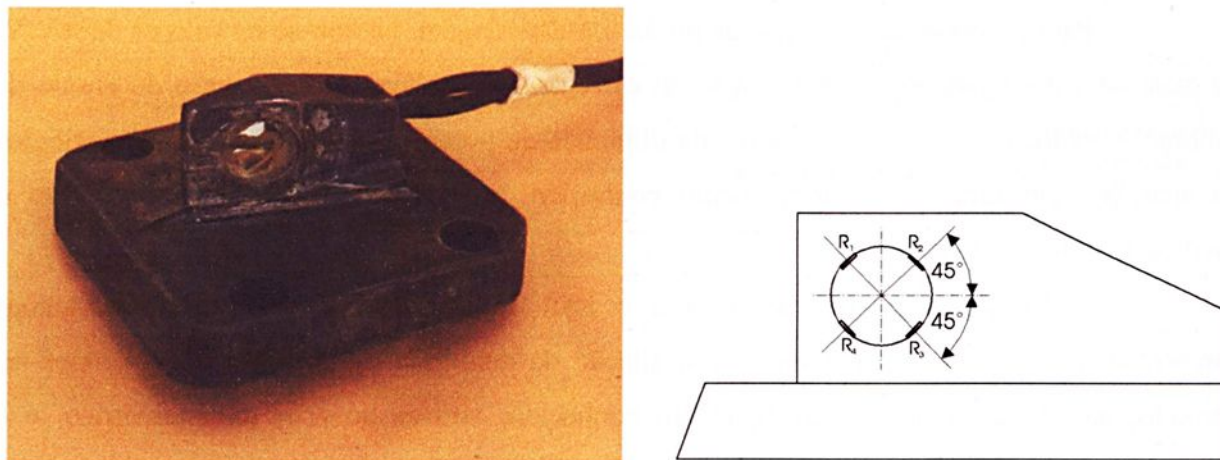


Figura 3.4 - Martelo pendular instrumentado.

O processo de lixamento da superfície do furo, que compreendeu em movimentos perpendiculares a cada troca de lixa, partindo-se da granulometria mais grossa até a mais fina, objetivou promover uma superfície mais isenta possível de riscos, condição necessária ao processo de colagem.

A compressão dos extensômetros logo após o processo de colagem representou um ponto de relevante cuidado, pois é nesta etapa que se sustenta todo o sucesso de uma boa e adequada instrumentação. Assim, projetou-se e construiu-se um dispositivo para comprimir simultaneamente os quatro extensômetros posicionados na superfície do furo. A fotografia do dispositivo de compressão encontra-se na Figura A.1 do Apêndice A.

O mecanismo de funcionamento do dispositivo é simples. Através de um esforço no sentido longitudinal, promovido pelo aperto da porca contra a mola, a peça cônica de seção circular bipartida se desloca radialmente no sentido do aumento de seu diâmetro, comprimindo simultaneamente os extensômetros alojados no furo do martelo pendular.

3.2.5 Avaliação da Qualidade da Colagem dos Extensômetros

O ensaio para verificar a qualidade da colagem dos extensômetros foi proposto para avaliar a performance da célula de carga após o processo de colagem dos extensômetros, considerando a acomodação do conjunto constituído pelo extensômetro, cola, cera e martelo. A única diferença existente entre este ensaio e o ensaio de calibração estática baseia-se na resposta medida pelo indicador de deformação, gerada pela aplicação de uma força conhecida.

Para o ensaio de avaliação da qualidade da colagem, anotou-se os valores de mV/V , do mostrador do equipamento, em função do carregamento aplicado. Para o caso do ensaio de calibração estática, anotou-se os valores da diferença de potencial, medidos na saída analógica do aparelho, em função do carregamento conhecido, pois é nesta saída que se conecta o osciloscópio digital de memória.

Utilizando a prensa mecânica e o anel dinamométrico acoplado a ela, ambos apresentados na Tabela 3.3, o ensaio de avaliação da qualidade da colagem compreendeu-se, portanto, na aplicação de um carregamento conhecido, através do anel dinamométrico, e a correspondente verificação da resposta em mV/V . A Figura 3.5 mostra a montagem experimental do ensaio.

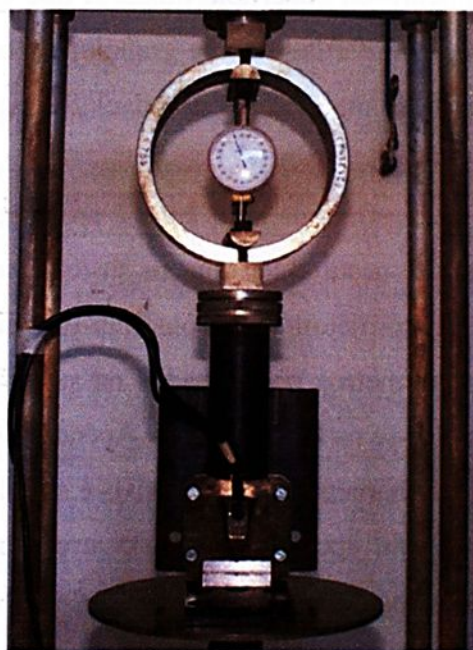


Figura 3.5 - Avaliação da qualidade da colagem dos extensômetros.

Assim, efetuou-se 3 ensaios, cada qual contendo 7 medidas de carregamento e descarregamento da célula de carga, para verificar a repetibilidade dos resultados em face dos esforços aplicados e a linearidade da resposta dos extensômetros utilizados como elementos sensitivos. A Tabela 3.4 e a Figura 3.6 ilustram a resposta do martelo, em mV/V , diante da aplicação gradual da força.

Tabela 3.4 - Ensaio para avaliar a qualidade da colagem dos extensômetros.

Pontos	Carregamento		Descarregamento	
	Força (Anel Dinamométrico) [kN]	Indicador de Deformação [mV/V]	Força (Anel Dinamométrico) [kN]	Indicador de Deformação [mV/V]
Ensaio N°1				
1	0	0	6,202	364
2	1,034	70	5,169	324
3	2,067	128	4,135	261
4	3,101	187	3,101	194
5	4,135	247	2,067	130
6	5,169	306	1,034	68
7	6,202	364	0	2
Ensaio N°2				
1	0	0	6,202	366
2	1,034	70	5,169	324
3	2,067	129	4,135	260
4	3,101	189	3,101	196
5	4,135	249	2,067	130
6	5,169	308	1,034	68
7	6,202	366	0	2
Ensaio N°3				
1	0	0	6,202	367
2	1,034	70	5,169	324
3	2,067	131	4,135	260
4	3,101	191	3,101	194
5	4,135	250	2,067	130
6	5,169	310	1,034	68
7	6,202	367	0	2
Média dos Ensaios				
1	0	0	6,202	365,7 (1,5)
2	1,034	70,0 (0,0)	5,169	324,0 (0,0)
3	2,067	129,3 (1,5)	4,135	260,3 (0,6)
4	3,101	189,0 (2,0)	3,101	194,7 (1,2)
5	4,135	248,7 (1,5)	2,067	130,0 (0,0)
6	5,169	308,0 (2,0)	1,034	68,0 (0,0)
7	6,202	365,7 (1,5)	0	2,0 (0,0)

Representando uma das formas de se medir a dispersão dos valores expostos na tabela acima, foi adotado excepcionalmente o desvio padrão como indicador das flutuações das medidas em torno do valor médio.



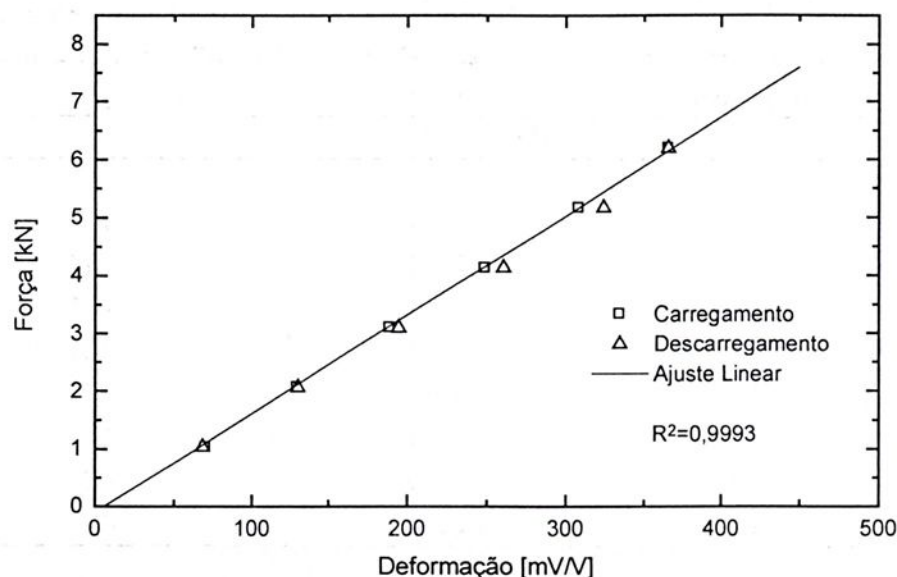


Figura 3.6 - Curva média do ensaio de avaliação da colagem dos extensômetros.

Portanto, em vista dos resultados obtidos conclui-se que a célula de carga apresenta boa repetibilidade, fato esse verificado pela dispersão dos resultados e pela figura acima, com base no coeficiente de linearidade $R^2=0,9993$.

3.2.6 Calibração Estática da Célula de Carga

O ensaio de calibração estática foi efetuado conforme mencionado no item anterior. A principal proposta foi obter a curva de calibração estática da célula de carga, isto é, a função linear que descreve o comportamento entre a força aplicada e o nível de diferença de potencial medido na saída analógica do indicador de deformação, pois é exatamente nesta saída, localizada no painel traseiro do aparelho, que o osciloscópio digital é conectado para capturar o sinal de força vs tempo, medido no ensaio Charpy instrumentado.

Como o ensaio de avaliação da performance da célula de carga apresentou bons resultados, efetuou-se 2 ensaios, cada qual contendo 9 medidas de carregamento, para obter a curva de calibração da célula de carga. A Tabela 3.5 apresenta os resultados medidos e a Figura 3.7 mostra a curva de calibração.

Tabela 3.5 - Resultados da calibração estática da célula de carga.

Pontos	Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) [x10 ⁻³ mm]	Força Aplicada Correspondente* [kN]	Saída Analógica (Indicador de Deformação) [V]
Ensaio N°1			
1	0	0	0
2	50	1,034	0,64
3	100	2,067	1,25
4	150	3,101	1,78
5	200	4,135	2,31
6	250	5,169	2,87
7	300	6,202	3,45
8	350	7,236	4,05
9	400	8,270	4,68
Ensaio N°2			
1	0	0	0
2	50	1,034	0,65
3	100	2,067	1,17
4	150	3,101	1,75
5	200	4,135	2,34
6	250	5,169	2,93
7	300	6,202	3,48
8	350	7,236	4,05
9	400	8,270	4,57
Média dos Ensaios			
1	0	0	0
2	50	1,034	0,645 (0,007)
3	100	2,067	1,210 (0,057)
4	150	3,101	1,765 (0,021)
5	200	4,135	2,325 (0,021)
6	250	5,169	2,900 (0,042)
7	300	6,202	3,465 (0,021)
8	350	7,236	4,050 (0,000)
9	400	8,270	4,625 (0,078)

* A força aplicada na célula de carga é obtida dividindo-se a leitura apresentada no relógio comparador pela constante de conversão do anel dinamométrico 0,4745.

Analogamente ao ensaio de avaliação da colagem dos extensômetros, também aqui foi adotado o desvio padrão como indicador da dispersão dos resultados utilizados na determinação da curva de calibração. Sua vantagem reside no cálculo rápido e no fato de possuir a mesma unidade de medida dos dados.



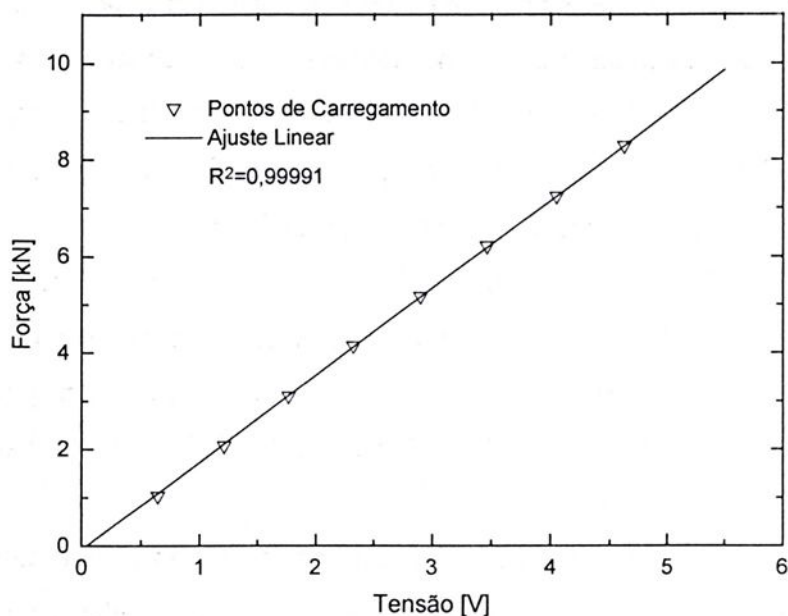


Figura 3.7 - Curva média do ensaio de calibração estática da célula de carga.

Assim, conforme ilustra a Figura 3.7, a função linear que relaciona o nível de tensão captado pelo osciloscópio digital de tempo real e a força aplicada na célula de carga é dada pela expressão abaixo, que se denomina *equação de calibração estática da célula de carga*.

$$F = 1,7824 \cdot V \quad (3.1)$$

onde F é a força em kN e V é o nível de tensão em V.

3.2.7 Ensaio de Flexão Monotônico em Três Pontos

Existem duas maneiras pelas quais é possível ratificar os resultados obtidos pelo ensaio Charpy instrumentado. A primeira relaciona-se à correspondência entre os valores de energia determinados convencionalmente pela máquina Charpy e os calculados numericamente, tomando-se por base os sinais medidos pelo sistema de aquisição acoplado à máquina. A segunda forma diz respeito à relação existente entre as forças máximas medidas monotônica e dinamicamente, nas mesmas condições experimentais do ensaio Charpy.

É sabido que a taxa de carregamento causa uma mudança no comportamento do material. Com o aumento da velocidade de aplicação da carga, a força máxima que o corpo de

prova suporta tende a se alterar, dependendo da capacidade de encruamento de cada material. Por esse motivo, as forças máximas medidas no ensaio de flexão em três pontos e no ensaio Charpy devem apresentar boa concordância. Mais especificamente, a força determinada dinamicamente necessita situar-se ligeiramente abaixo ou acima da força máxima obtida monotonicamente, considerada, portanto, como valor de referência.

O ensaio de flexão monotônico foi conduzido da mesma forma que o ensaio destinado à avaliação da qualidade da colagem dos extensômetros, apresentado no item 3.2.5. A reprodução mais fiel possível do ensaio dinâmico executado na máquina Charpy mereceu devida importância no decorrer do ensaio quase estático. Único ponto distinto foi o posicionamento dos corpos de prova na base da prensa mecânica.

Construiu-se um dispositivo com vão de 40mm, tal como a atual normalização ISO específica, contendo uma medida de profundidade suficiente para acomodar o corpo de prova no momento e após a flexão. A carga máxima medida para o aço SAE 1020, caracteristicamente bem mais dúctil que os aços SAE 1040 e 300M, é melhor denominada carga de escoamento generalizado, uma vez que os corpos de prova não sofreram ruptura total. A força foi aplicada por meio do anel dinamométrico devidamente acoplado à prensa, sob uma taxa de deformação igual a 10^{-4} s^{-1} . Os resultados são mostrados na Tabela 3.1, no início deste capítulo.

3.3 Metodologia - Etapa 2

A segunda etapa de trabalho foi assim classificada por introduzir variáveis adicionais na busca constante do entendimento sobre o sistema de medida. Além da adoção da liga de alumínio 7050 e do aço 8640 como materiais dos corpos de prova, foi possível utilizar o medidor de deformação e deslocamento ajustado para operar em uma frequência de corte de 1000Hz, isto é, 200 vezes a frequência empregada na primeira etapa.

Ademais, dois sensores dinâmicos, de funções piezoelétricas, também fizeram parte desta segunda seqüência de ensaios. A idéia foi alojá-los na base de apoio dos corpos de prova de modo que a força de impacto, imposta pelo martelo pendular ao corpo de prova, pudesse ser medida pelas reações de apoio do próprio corpo de prova com o suporte da máquina, como uma viga bi-apoiada. Detalhes da instalação dos transdutores na base da máquina Charpy, especificação dos novos equipamentos adotados e resultados das averiguações dos transdutores e condicionadores serão apresentados a seguir.



3.3.1 Descrição da Instalação Experimental

Analogamente ao item 3.2, todo o aparato experimental foi mantido, apenas acrescido do novo conjunto de transdutores piezoelétricos e condicionadores de alta frequência de resposta. Portanto, a máquina de ensaio Charpy estava duplamente instrumentada, isto é, por extensômetros elétricos de resistência fixados no martelo pendular e por transdutores piezoelétricos de força posicionados na base de apoio dos corpos de prova.

O sistema de medida, dessa forma, compreendeu-se na utilização simultânea de dois tipos distintos de células de carga, com princípios diferenciados de funcionamento e posições distintas na máquina. O transdutor composto de extensômetros elétricos de resistência foi conectado ao medidor de deformação com a frequência de corte aumentada em 200 vezes, em comparação à primeira etapa de trabalho.

Os transdutores piezoelétricos foram conectados aos condicionadores de sinais estritamente especificados para esse tipo de transdutor, cuja frequência de resposta é da ordem de 100kHz. No entanto, apenas um dos sensores serviu para a medição do sinal tensão vs tempo, devido ao número limitado de canais do osciloscópio digital.

Após uma verificação do comportamento dos transdutores piezoelétricos, a qual será melhor descrita no item 3.3.4, constatou-se que a boa proximidade dos resultados conferia a utilização segura e confiável de qualquer um dos dois elementos sensores piezoelétricos. Assim, apenas um dos transdutores dinâmicos, o de código 3663, forneceu a medida da reação dos corpos de prova. A Figura 3.8 mostra de maneira ilustrativa o sistema de medida aplicado na segunda etapa do processo de aquisição de sinais e a Figura 3.9 apresenta a montagem experimental.

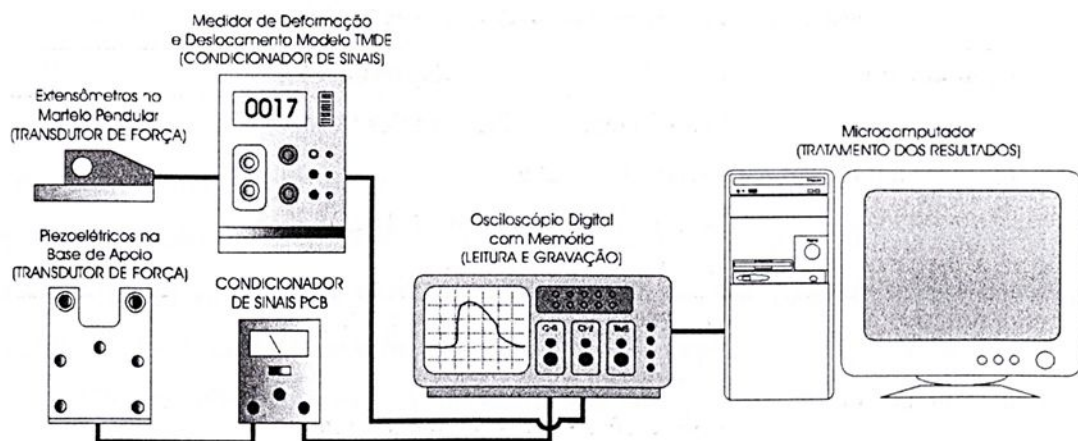


Figura 3.8 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 2 do trabalho.

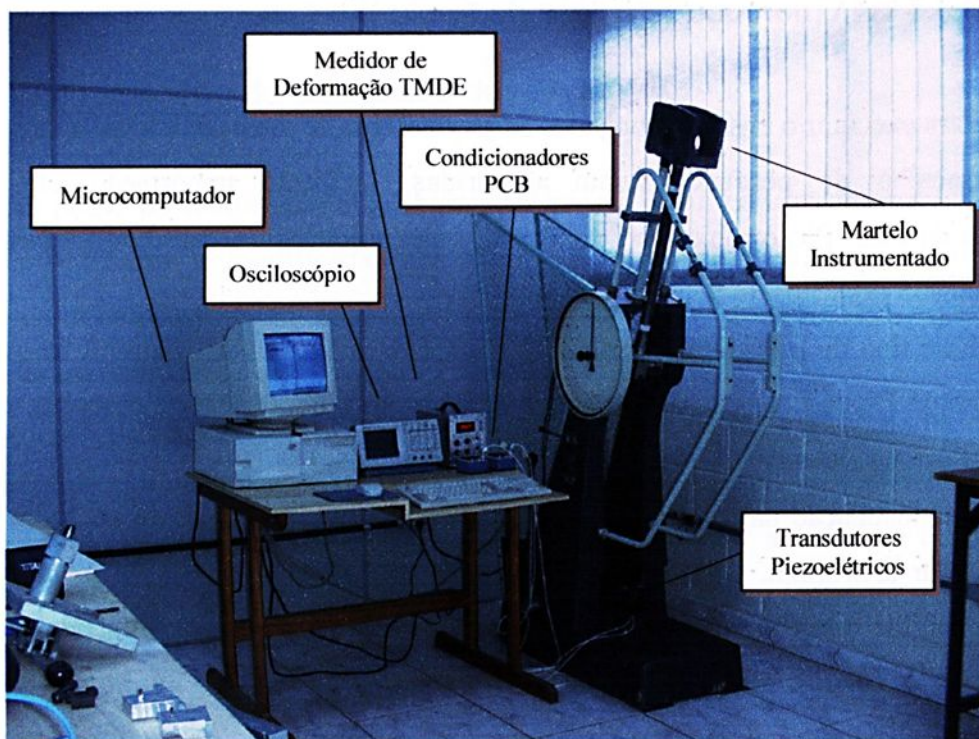


Figura 3.9 - Montagem experimental empregada na etapa 2 do trabalho.

3.3.2 Especificação dos Equipamentos

Os equipamentos necessários à continuidade do trabalho da primeira etapa são apresentados abaixo na Tabela 3.6, contendo algumas informações julgadas importantes. O transdutor de força, próprio para carregamento de impacto, foi acoplado ao condicionador e amplificador de sinais, que por sua vez, era conectado ao osciloscópio de memória.

Tabela 3.6 - Equipamentos utilizados na etapa 2 do trabalho.

Equipamento	Especificações
Condicionador e Amplificador de Sinais	Fabricante: PCB Piezotronics Inc. Modelo: 480E09 Frequência de Resposta: 0,15 a 100kHz Ganho: x1, x10 e x100
Transdutor de Força	Fabricante: PCB Piezotronics Inc. Modelo: M200B05 Dimensões Gerais: Ø16,5 x 8mm Força de Compressão Máxima: 44,48kN

3.3.3 Instrumentação da Base de Apoio dos Corpos de Prova

Para executar o ensaio e comparar as arquiteturas de medição adotadas nesta segunda etapa do trabalho de pesquisa, foram adquiridas, mediante importação efetuada pela representante da PCB Piezotronics Inc. no Brasil, duas unidades de transdutores piezoelétricos modelo M200B05 descritos no item anterior.

Esse tipo de transdutor apresenta características adequadas quanto à instrumentação na base de apoio Charpy, tais como tamanho reduzido, alta frequência de resposta, capacidade para suportar cargas elevadas e adequada resposta dinâmica.

Sua instalação na máquina foi efetuada construindo-se uma base de apoio de corpos de prova similar à original, tanto com respeito à forma, quanto em relação à microestrutura. Apenas um detalhe constitutivo foi alterado, sem comprometimento das funções da peça. Os chanfros na parte superior não foram usinados na peça modificada com intuito de manter maior porção de material na região próxima aos furos posicionadores dos transdutores e, conseqüentemente, maior rigidez do componente nessa região crítica.

Utilizou-se, portanto, o aço baixa liga 8640 e usinou a peça com as devidas modificações para alojar os transdutores. Um tratamento térmico de têmpera e revenimento foi realizado, atingindo uma dureza entre 58 e 60HRC, conforme a peça original. A fotografia contendo um transdutor posicionado em um dos furos pode ser vista na Figura A.2 do Apêndice A. A seqüência de montagem dos transdutores na máquina é resumida a seguir:

- a. conectou-se os cabos nos transdutores piezoelétricos e nos canais dos respectivos condicionadores;
- b. montou-se a base de apoio modificada na máquina de ensaio, primeiramente, por meio dos furos superiores laterais;
- c. alojou-se os transdutores nos respectivos furos;
- d. fixou-se os transdutores na própria base de apoio por meio de parafusos;
- e. alojou-se os cabos dos transdutores nos canais da base de apoio modificada;
- f. fixou-se o encosto original na base de apoio modificada por meio de parafusos nos furos inferiores laterais e superior central.

A Figura A.3, apresentada no Apêndice A, mostra a fixação da base de apoio e dos transdutores na estrutura da máquina.

3.3.4 Avaliação da Qualidade dos Sinais

Em posse de todo o aparato laboratorial pronto, com os transdutores e a base dos corpos de prova Charpy-V modificada fixados na máquina de ensaio, bem como os cabos devidamente conectados aos condicionadores, osciloscópio e microcomputador, alguns ensaios preliminares foram realizados.

O objetivo foi averiguar a fixação dos transdutores, o desempenho da base de apoio modificada perante o impacto do martelo pendular e, por fim, avaliar a qualidade dos sinais fornecidos pelos transdutores nestas condições de ensaio e levantar a curva de calibração em tensão por força, dados em V e kN, respectivamente, com base nas cartas de calibração dos transdutores.

As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram de maneira comparativa as curvas obtidas pelos dois transdutores piezoelétricos simultaneamente. O canal 1 refere-se ao transdutor nº 3672 e o canal 2 ao transdutor nº 3663. É possível notar que não há diferença entre os sinais medidos, mesmo tendo cartas de calibração ligeiramente distintas entre si. As curvas de calibração dos transdutores piezoelétricos apresentam-se na Figura 3.12.

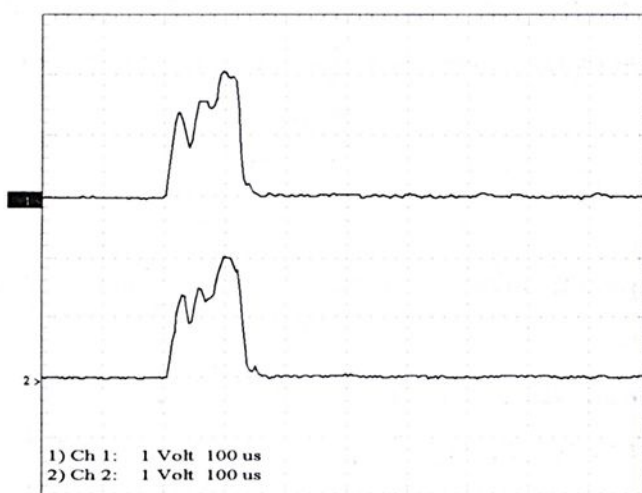


Figura 3.10 - Sinais para o aço 8640 medidos simultaneamente.

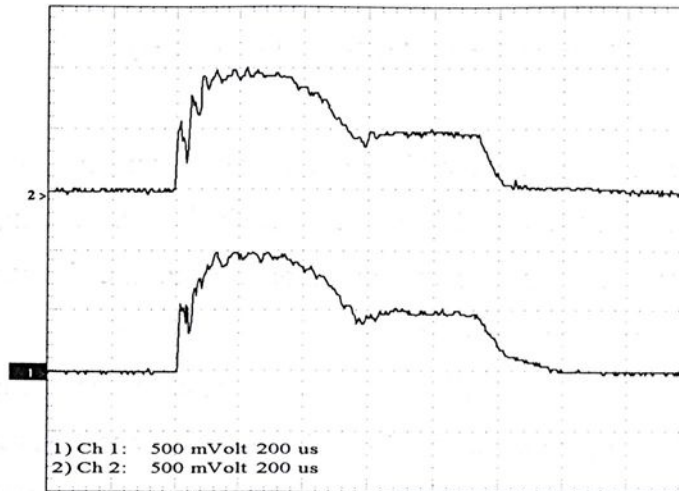


Figura 3.11 - Sinais para o alumínio 7050 medidos simultaneamente.

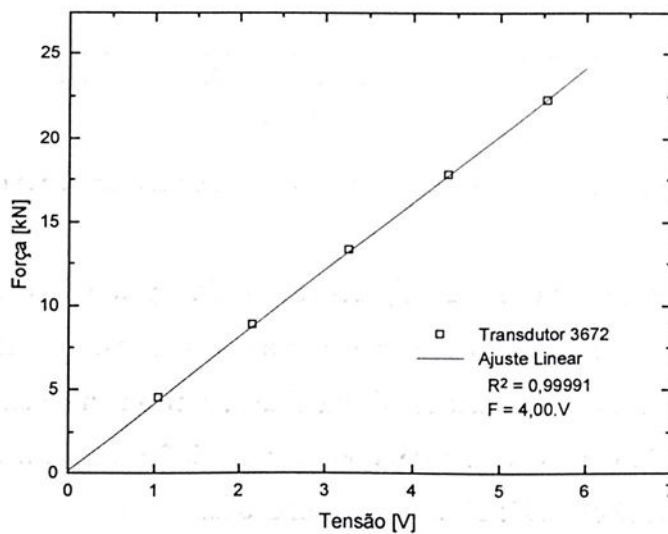
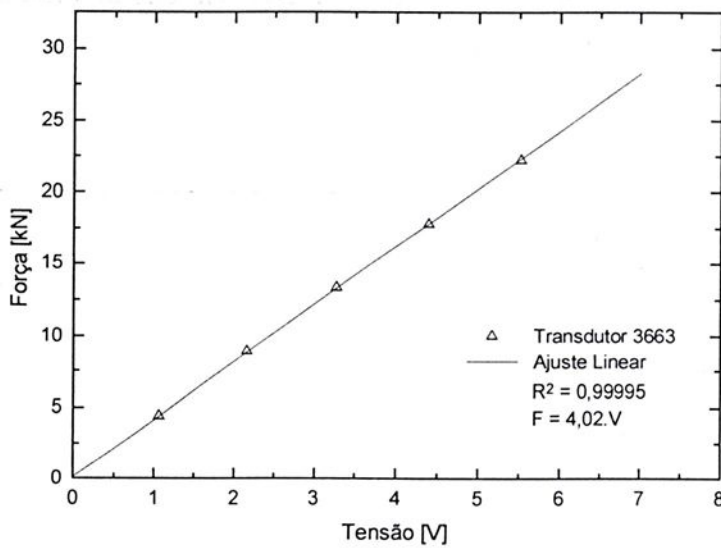


Figura 3.12 - Curvas de calibração dos transdutores n° 3663 e 3672.

3.3.5 Curva de Resposta do Medidor de Deformação

Os ensaios desta segunda etapa foram conduzidos mantendo-se o martelo pendular instrumentado com extensômetros elétricos de resistência. Entretanto, o condicionador amplificador de sinais acoplado à esta célula de carga foi modificado para operar com uma frequência de corte maior, da ordem de 1kHz.

Esta modificação requereu do fabricante a desmontagem do aparelho e a substituição de componentes eletrônicos responsáveis pelo filtro de corte. O procedimento para determinação da nova curva de resposta do condicionador de sinais foi o mesmo da primeira etapa, isto é, frequências foram aplicadas no aparelho, por meio de um gerador de frequências, e os valores de voltagem na saída analógica do aparelho foram medidos por um multímetro. A Figura 3.13 mostra a resposta do medidor de deformação.

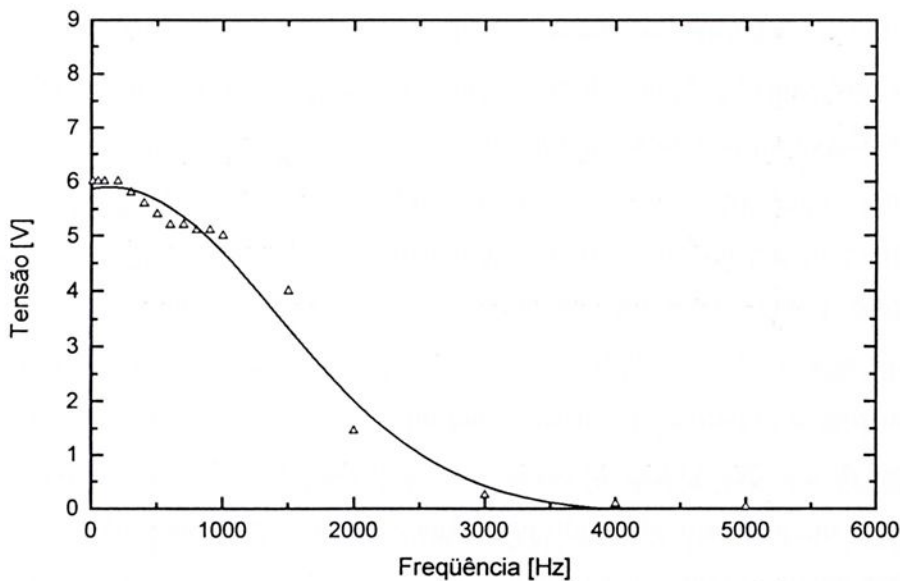


Figura 3.13 - Curva de resposta do medidor de deformação e deslocamento após o ajuste.

É importante salientar que a configuração do filtro para eliminar frequências acima de 1kHz refere-se às atenuações comumente aceitas nas aquisições de sinais, ou seja, atenuação em torno de 30% ou 3dB. Para o caso dos sinais medidos na máquina de ensaio Charpy, o valor da frequência de corte é diminuído para, aproximadamente, 500Hz, pois, neste tipo de aquisição dinâmica, atenuações de 10% ou 0,915dB são recomendadas.

3.4 Procedimentos de Ensaio

A metodologia empregada na execução do ensaio Charpy instrumentado fundamentou-se basicamente em quatro procedimentos descritos abaixo, baseados no manual de operação da máquina Charpy convencional e na norma ASTM E-23.

A. Quanto à segurança durante a execução do ensaio

A máquina de ensaio Charpy contém o martelo pendular, que se constitui de uma peça móvel e pesada. Apesar das proteções metálicas em torno da trajetória do martelo e do seu mecanismo de acionamento, contendo uma alavanca de segurança, implementou-se um procedimento experimental no que se refere à preparação da máquina e execução do ensaio.

Uma área em torno da máquina foi delimitada no sentido de se evitar aproximações indevidas e um sistema de travamento adicional foi implementado para fixar o martelo pendular na própria estrutura da máquina durante a retirada ou posicionamento dos corpos de prova na base de apoio do equipamento. Assim, durante qualquer manipulação próxima à máquina ou nela própria, o martelo deveria se encontrar sempre travado.

Durante a realização do experimento, tendo todos os equipamentos devidamente conectados e prontos para a aquisição do sinal, os envolvidos deveriam permanecer além da área delimitada, assumida como segura, para promover a prática experimental com total resguardo.

A utilização de luvas e botinas foram desnecessárias, pois a manipulação durante o ensaio ocorre somente com partes solidárias à máquina e corpos de prova, que se constituem em peças de pequenas dimensões. O uso de óculos de segurança também foi descartado em virtude de a máquina conter um anteparo adequado para armazenar os corpos de prova após a ocorrência dos impactos. Esse anteparo tem como principal função evitar possíveis projeções dos materiais rompidos pelo martelo pendular.

B. Quanto ao controle das variáveis críticas

Com a meta de aprimorar a qualidade do ensaio e, conseqüentemente, obter resultados de maior confiabilidade, efetuou-se uma triagem das variáveis críticas que poderiam afetar os resultados obtidos da maneira mais severa possível. As variáveis críticas do ensaio se concentram basicamente no corpo de prova. São elas:



- i. posicionamento na máquina de ensaio;
- ii. tolerância dimensional;
- iii. acabamento superficial;
- iv. reprodutibilidade na usinagem do entalhe;
- v. anisotropia.

Todos os itens mencionados acima foram cuidadosamente estudados e acompanhados. Um dispositivo foi construído de modo que o entalhe fosse posicionado o mais próximo possível do eixo de simetria da base de apoio do corpo de prova, o que demonstra, segundo a literatura especializada, que a tolerância dimensional relativa ao comprimento do corpo de prova não é tão relevante, sendo de 52,5 a 55,0mm. É notório que para dimensões utilizadas em mecânica, tal tolerância representa uma faixa de erro permissível grande, o que condiciona o posicionamento do entalhe na máquina, e não o comprimento do corpo de prova, à classificação de variável crítica.

Da mesma forma, a tolerância dimensional e o acabamento superficial dos corpos de prova foram executados de forma conciliatória, isto é, dentro das possibilidades de equipamentos e ferramentas de usinagem associadas às exigências atribuídas pela norma ASTM E-23. A reprodutibilidade na confecção dos entalhes também mereceu atenção. Qualquer alteração no seu perfil, bem como em sua profundidade, pode se constituir a fonte geradora de uma dispersão dos resultados de energia absorvida e, conseqüentemente, da tenacidade à fratura dinâmica aparente. Uma discussão sobre a usinagem do entalhe Charpy será detalhada no Capítulo 5.

Por fim, no sentido de minimizar o problema da anisotropia dos materiais metálicos ensaiados, os corpos de prova foram fabricados considerando o mesmo lote e a mesma direção de retirada do material. Um descontrole durante a usinagem e o posicionamento do entalhe no próprio corpo de prova em relação às faces do material bruto, além da retirada aleatória dos corpos de prova do material podem causar sérias dispersões dos resultados. Na realidade, pode-se dizer que o ensaio Charpy não é dispersivo, e sim altamente sensível.

C. Quanto à conexão e configuração dos equipamentos eletrônicos

Por envolver equipamentos e aparelhos mais sofisticados e sensíveis, na ligação destes instrumentos adotou-se procedimentos de cautela, no sentido único de não danificá-los.



Sendo assim, os fios das células de carga foram conectados aos condicionadores somente quando estes se encontravam desconectados da rede elétrica.

O cabo de comunicação serial RS232, DB9, foi conectado entre o microcomputador e o osciloscópio digital de tempo real somente quando estes estavam desligados e desconectados da rede elétrica. Antes da execução de qualquer ensaio, uma verificação das ligações era efetuada em cada aparelho do sistema de medida.

O medidor de deformação, após a acomodação eletrônica por um tempo de aproximadamente 30 minutos, recomendado pela fabricante, foi ajustado para operar na sensibilidade de 1mV/V, ou seja, 1mV/V lido no mostrador do aparelho corresponde a 2000 $\mu\text{m/m}$ ou 2000 microdeformações. A tensão de excitação do circuito resistivo utilizada foi de 5V, o que confere, associada à sensibilidade adotada, uma tensão máxima na saída analógica de 10V, fato esse comprovado através do sinal de calibração originado pelo próprio equipamento. Todos os procedimentos aqui descritos foram seguidos conforme o manual de operações do aparelho.

O osciloscópio digital de memória, utilizado para promover a leitura do sinal de tensão no tempo, foi configurado segundo o manual de operações do equipamento. No entanto, para sinais impulsivos, caso do Charpy instrumentado, que apresenta um tempo de ocorrência do fenômeno muito reduzido, adotou-se a função denominada “disparo único” associada a um nível de *trigger* - permissão para iniciar a leitura do sinal - adequadamente baixo. Essa combinação foi escolhida de modo que o sinal era capturado um única vez e armazenado automaticamente na memória do aparelho, para posterior transferência de suas informações aos arquivos de dados.

D. Quanto à execução do ensaio

Os procedimentos adotados para a realização do ensaio objeto deste trabalho foram assim determinados por indicarem maior confiabilidade aos resultados, uma vez que se tem o controle de cada passo durante a execução do ensaio. Dessa forma, enumera-se abaixo algumas atitudes assumidas como essenciais ao bom andamento do ensaio.

- Em posse do sistema de medida pronto para a coleta do sinal, posicionava-se o martelo pendular na altura desejada. Caso a altura fosse adversa à padrão da máquina, isto é, correspondente à energia de 300J, utilizava-se um dispositivo de variação da altura de abandono do martelo próprio da máquina de ensaio Charpy convencional;

- Antes de acionar as alavancas da máquina para iniciar os ensaios, sendo a segunda uma alavanca de segurança, verificava se a trajetória do martelo estava isenta de obstáculos;
- Preparava-se o mostrador da máquina de ensaio Charpy convencional para a captura da energia absorvida pelos corpos de prova ensaiados, pois são dados adicionais e considerados valores de referência para a interpretação dos resultados;
- Estando todos os itens acima dentro do especificado, acionava-se o martelo pendular e o corpo de prova era rompido, a energia era indicada na máquina e a curva tensão vs tempo era capturada pela osciloscópio digital;
- A cada corpo de prova ensaiado, estes eram retirados da máquina, devidamente identificados e armazenados para posterior análise da superfície de fratura caso houvesse necessidade de maiores informações;
- Toda e qualquer observação sobre o comportamento de cada corpo de prova ensaiado, bem como anotações adicionais relevantes eram efetuadas na planilha de resultados, elaborada para organizar e concentrar as informações em documento único;
- Após a aquisição do sinal pelo osciloscópio digital, o sinal era transferido para um arquivo de dados, em linguagem ASC, através do software Wavestar, sendo tratado matematicamente pela rotina computacional assim denominada Charpy Instrumentado, utilizando a linguagem de programação Matlab. Esta rotina foi especialmente elaborada para fornecer todas as informações possíveis sobre o sinal obtido, tais como força máxima, energias envolvidas no fenômeno, integração numérica do sinal, construção de gráficos, determinação dos valores de tenacidade à fratura, cálculo das distribuições de probabilidades, entre outras. A estrutura geral da rotina computacional se encontra na Figura B.1 do Apêndice B.



Resultados

4.1 Descrição dos Resultados - Etapa 1

A seguir são apresentados os resultados obtidos nesta etapa do trabalho, na qual o martelo pendular foi transformado em uma célula de carga pelo emprego de extensômetros elétricos de resistência. Os ensaios foram executados considerando como fontes de estudo dois casos distintos: a influência de velocidade de impacto e a influência da variação microestrutural dos corpos de prova no tipo de sinal medido e na tenacidade à fratura dinâmica procurada.

Ressalta-se que o emprego de diferentes velocidades de impacto foi possível utilizando-se um dispositivo posicionador do martelo pendular, originário da própria máquina de ensaio Charpy convencional. Por meio do dispositivo, o martelo foi fixado em alturas variadas, em relação à posição do corpo de prova, as quais imprimiram distintas velocidades de impacto no ponto mais baixo da trajetória do martelo pendular. A Tabela 4.1 dada a seguir indica as alturas adotadas e as respectivas velocidades de impacto.

Tabela 4.1 - Velocidades de impacto adotadas.

Altura [m]	Velocidade de Impacto [m/s]	Energia Correspondente [J]
1,53	5,48	300
1,40	5,24	274
1,01	4,45	198

Isto posto, vale lembrar que a variação microestrutural dos corpos de prova foi implementada não por tratamentos térmicos ou mecânicos, mas pela escolha de materiais, cujos comportamentos perante os carregamentos de impacto fossem diferentes entre si. Assim, os aços SAE 1020, 1040 e 300M foram adotados para constituírem os corpos de prova, de maneira que uma avaliação do sistema de medida pudesse ser concretizada.

4.1.1 Influência da Velocidade de Impacto

As Figuras 4.1 à 4.3 apresentam um conjunto de sinais força vs tempo para cada tipo de material ensaiado, ambos submetidos às distintas velocidades de impacto apresentadas na Tabela 4.1. Cada curva corresponde à média de 3 amostras para as mesmas condições de ensaio. Excepcionalmente neste item, a velocidade de impacto do martelo pendular será denotada por V , como pode ser visto nas Figuras 4.1 à 4.3.

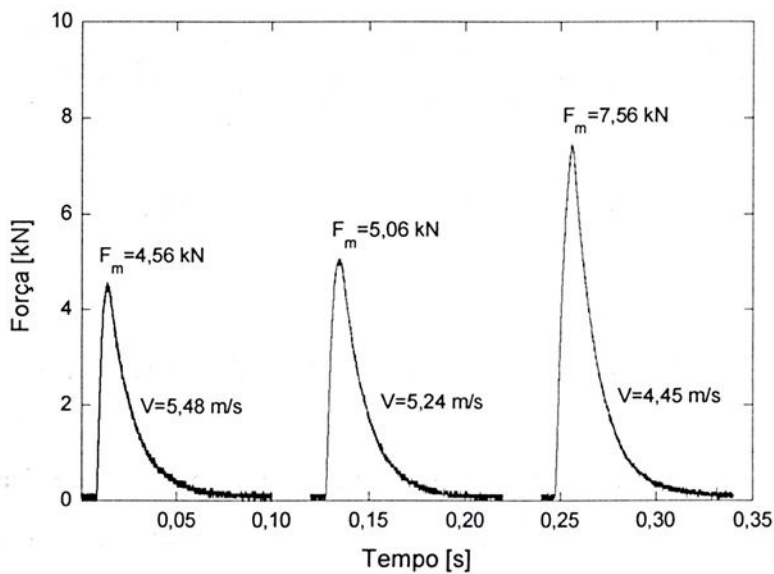


Figura 4.1 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 1020.

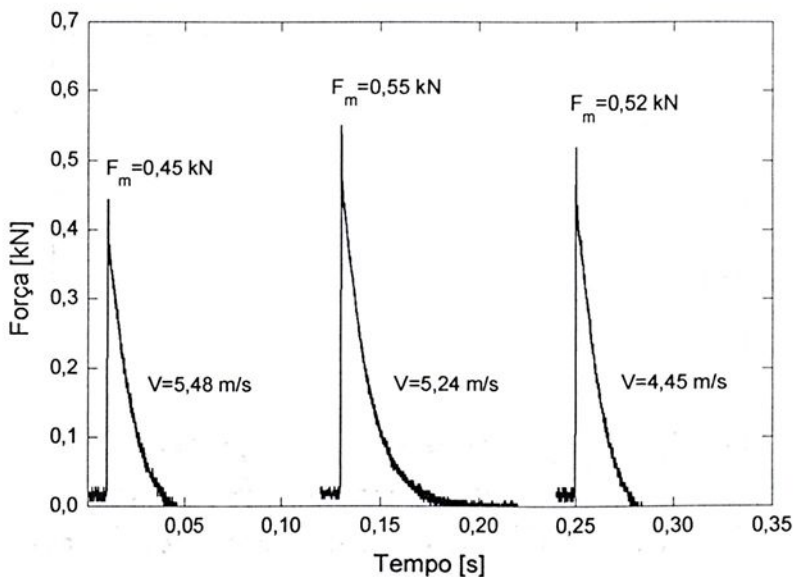


Figura 4.2 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 1040.

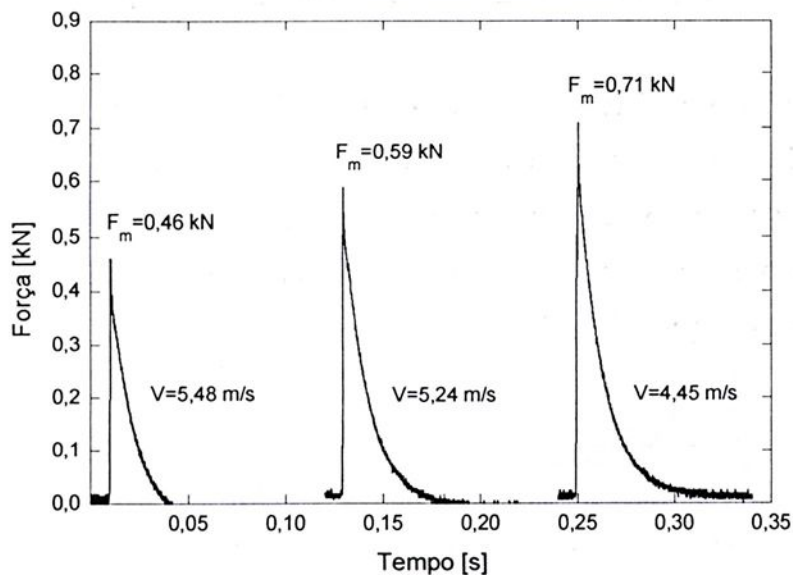


Figura 4.3 - Curvas força vs tempo para o aço 300M.

4.1.2 Influência da Variação Microestrutural dos Materiais

De modo análogo, as Figuras 4.4 à 4.6 apresentam conjuntos de sinais força vs tempo para os 3 tipos de materiais ensaiados, em que cada conjunto foi submetido às distintas velocidades de impacto. Cada curva mostrada nas figuras corresponde à média de 3 amostras para as mesmas condições de ensaio.

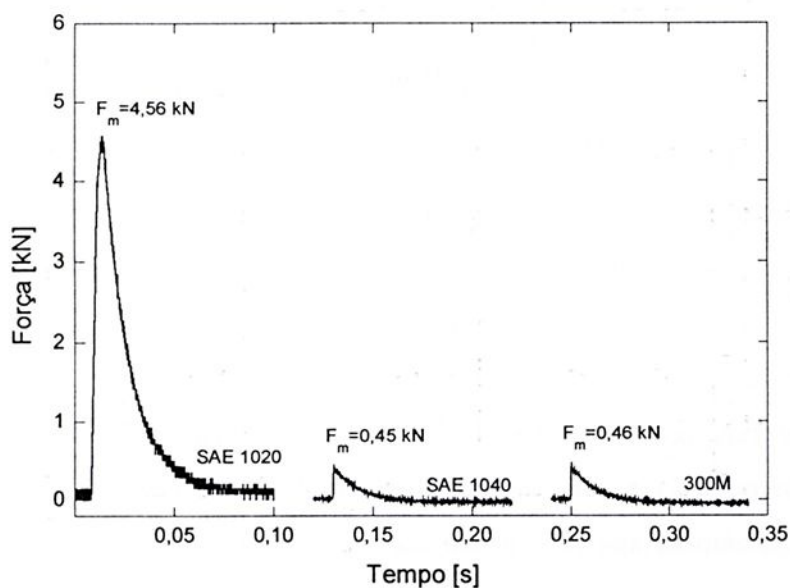


Figura 4.4 - Curvas força vs tempo para diferentes materiais. $V_0 = 5,48 \text{ m/s}$.

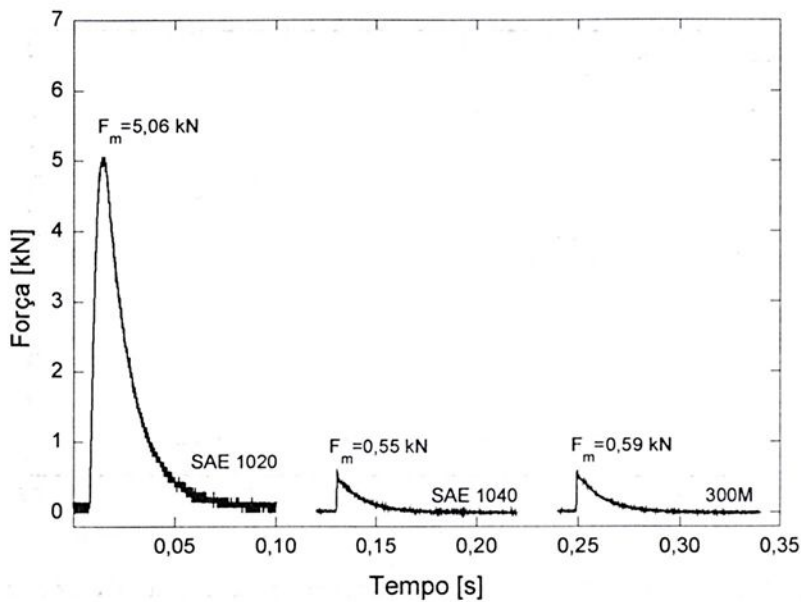


Figura 4.5 - Curvas força vs tempo para diferentes materiais. $V_0 = 5,24$ m/s.

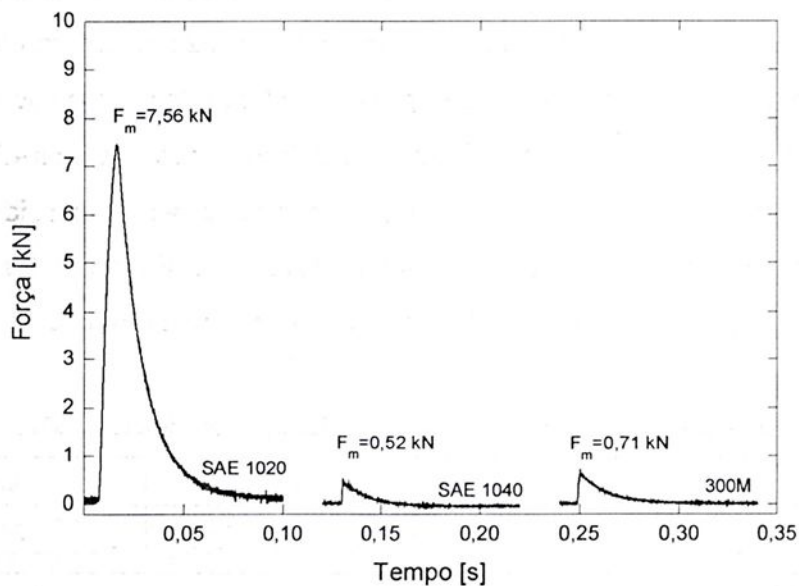


Figura 4.6 - Curvas força vs tempo para diferentes materiais. $V_0 = 4,45$ m/s.

Pode-se notar pela análise das Figuras 4.1 a 4.6 que os valores de força máxima estão grandemente atenuados, especialmente para os aços frágeis, tais como o SAE 1040 e 300M. As prováveis causas e implicações desses resultados merecem atenção e serão detalhadamente abordados no Capítulo 5.

O gráfico mostrado a seguir na Figura 4.7 sintetiza as combinações das variáveis de estudo velocidade de impacto e variação microestrutural dos corpos de prova. Os valores de tenacidade à fratura dinâmica aparente foram calculados e locados no gráfico em função da velocidade de impacto para todos os materiais ensaiados.

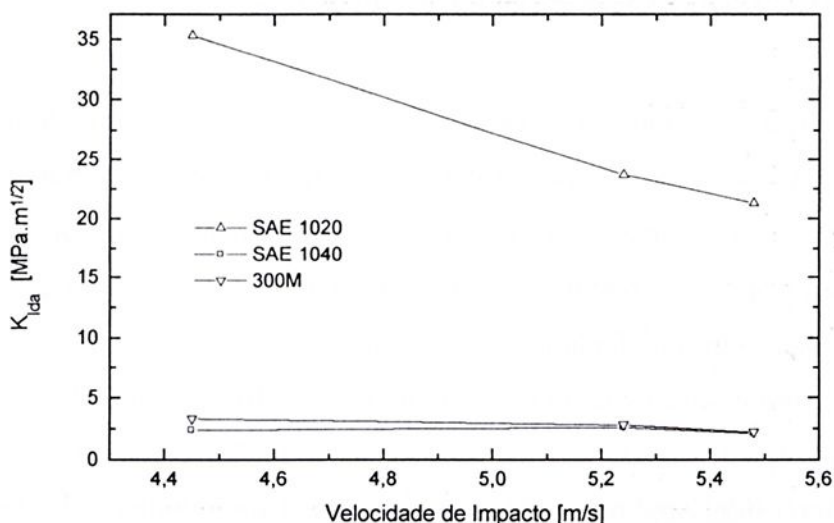


Figura 4.7 - Tenacidade à fratura dinâmica aparente em função da velocidade de impacto.

A seguir apresentam-se, como forma complementar aos resultados, as forças máximas medidas pela célula de carga e os valores da tenacidade à fratura dinâmica aparente para todas as combinações de velocidade de impacto e material dos corpos de prova. As forças máximas e os valores de tenacidade à fratura, mostrados nas Tabelas 4.2 e 4.3, foram determinados considerando uma amostragem de 3 corpos de prova. A tenacidade à fratura foi calculada com base na Equação 2.21. As seguintes taxas de deformação foram empregadas: 10^3 s^{-1} para carregamento dinâmico e 10^{-4} s^{-1} para carregamento monotônico.

Tabela 4.2 - Forças máximas medidas dinâmica e monotonicamente [kN].

Velocidade de Impacto [m/s]	Aço 1020		Aço 1040		Aço 300M	
	Charpy Instrumentado	Flexão Monotônico	Charpy Instrumentado	Flexão Monotônico	Charpy Instrumentado	Flexão Monotônico
5,48	4,56		0,45		0,46	
5,24	5,06	12,5	0,55	13,0	0,59	17,6
4,45	7,56		0,52		0,71	

Tabela 4.3 - Valores de tenacidade à fratura aparente [MPa.m^{1/2}]¹.

Velocidade de Impacto [m/s]	Aço 1020		Aço 1040		Aço 300M	
	Charpy Instrumentado	Flexão Monotônico	Charpy Instrumentado	Flexão Monotônico	Charpy Instrumentado	Flexão Monotônico
5,48	21,4		2,1		2,2	
5,24	23,8	58,7	2,6	61,1	2,8	82,7
4,45	35,5		2,4		3,3	

¹ O cálculo das incertezas dos resultados encontra-se no Apêndice C.



4.2 Descrição dos Resultados - Etapa 2

Os resultados de todos os testes e ensaios realizados simultaneamente com os transdutores piezoelétricos e com o martelo pendular instrumentado são apresentados a seguir. Assim, são mostradas curvas força vs tempo e força vs deslocamento, bem como as informações extraídas delas, tais como forças máximas, energias medidas, energias calculadas pelas curvas e os valores da tenacidade à fratura dinâmica aparente obtidos.

Os materiais ensaiados nesta etapa foram os aços 1040, 8640 e 300M, assim como a liga de alumínio 7050, todos considerados na condição como fornecidos. Observa-se que dois novos materiais foram inseridos: o aço 8640 e a liga 7050 de alumínio. Os demais materiais pertenciam ao mesmo lote dos materiais empregados na etapa 1 e às mesmas condições de usinagem dos corpos de prova.

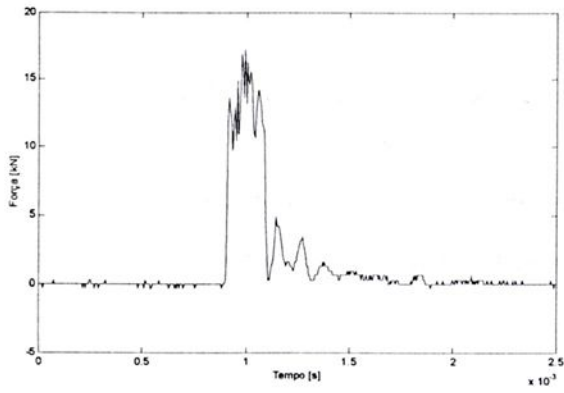
Ressalta-se que todos os materiais acima, exceto o aço 1040, também foram testados, para efeito de comparação dos resultados, em uma máquina de ensaio Charpy instrumentado da marca INSTRON WOLPERT P30, localizada no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos, campus da Universidade de São Paulo - USP.

O martelo pendular dessa máquina possui uma ponte simétrica de extensômetros elétricos de resistência, devidamente protegidos, posicionados em lados opostos do cutelo. A aquisição dos dados e o tratamento dos resultados são efetuados pelo programa *Labview* da *National Instruments*. O sistema de medida opera a um *rise time* de 350ns, amplificação de até 100 vezes e tensão de excitação do circuito em ponte variando entre 2,5 e 10V. Possui filtros para minimizar ruídos com ampla faixa de frequências de corte.

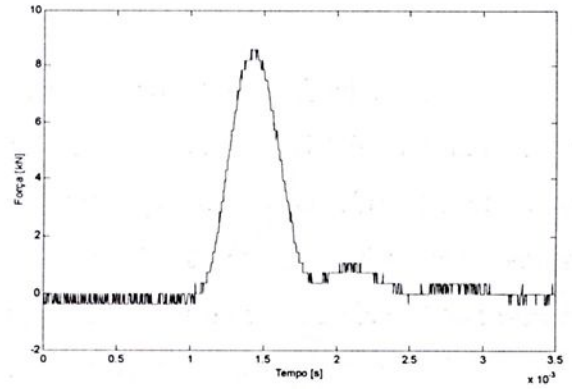
Assim, um total de 3 sistemas de medição foi adotado na aquisição de sinais Charpy para compor este estudo, os quais são resumidos a seguir: a) PCB, utilizando transdutores piezoelétricos de impacto; b) SENSORTEC, empregando extensômetros elétricos de resistência posicionados na superfície interna de um furo efetuado no cutelo e c) INSTRON WOLPERT, aplicando extensômetros elétricos de resistência localizados em lados opostos do cutelo.

Diferentemente dos procedimentos adotados na primeira etapa do trabalho, os ensaios aqui realizados foram efetuados considerando apenas a velocidade de impacto padrão da máquina, isto é, de 5,48m/s. Uma amostragem de 2 corpos de prova para o aço 1040 e alumínio 7050 foi utilizada. Para os aços 8640 e 300M empregou-se 3 amostras. A seguir apresentam-se todos os conjuntos de sinais medidos.



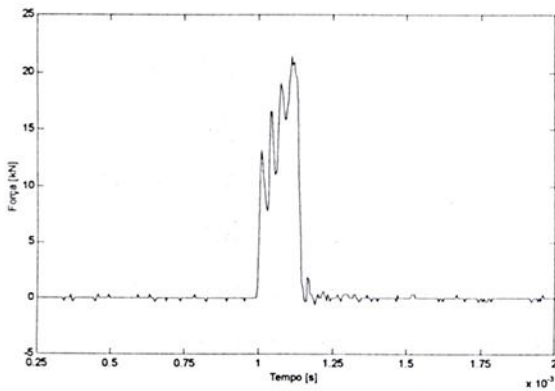


(a)

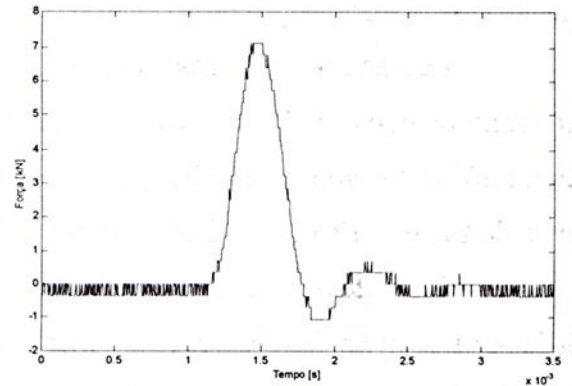


(b)

Figura 4.8 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 1040 obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.

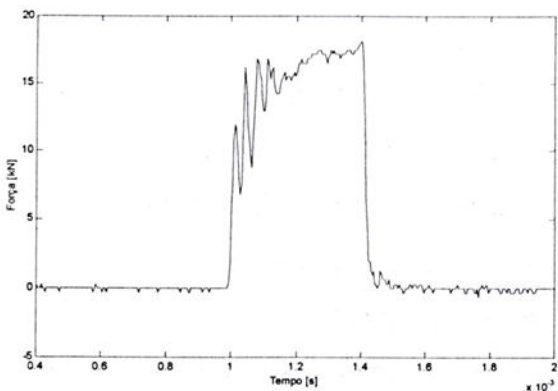


(a)

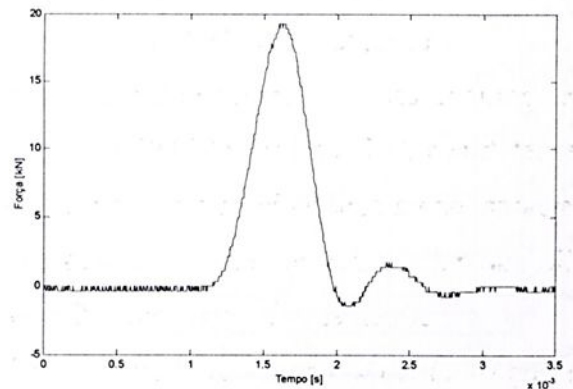


(b)

Figura 4.9 - Curvas força vs tempo para o aço SAE 8640 obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.

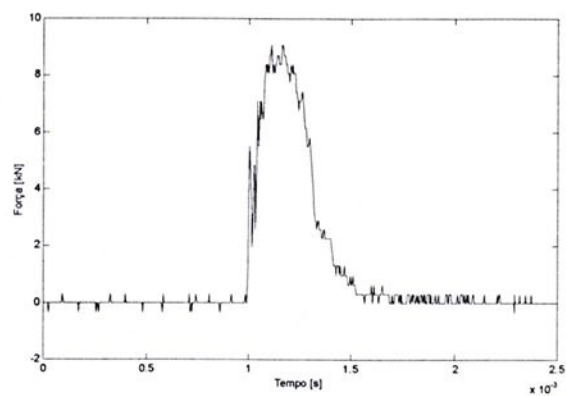


(a)

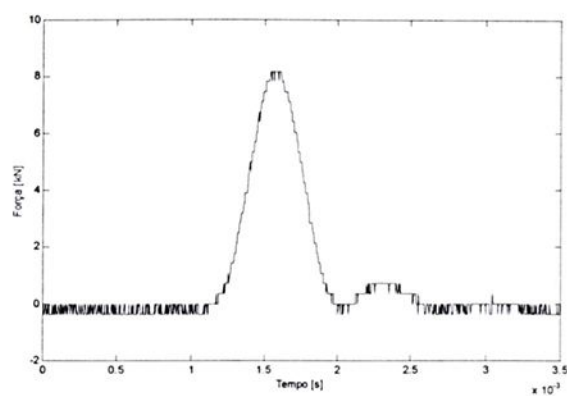


(b)

Figura 4.10 - Curvas força vs tempo para o aço 300M obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.

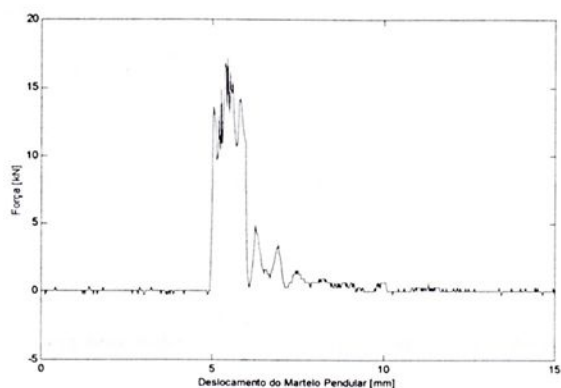


(a)

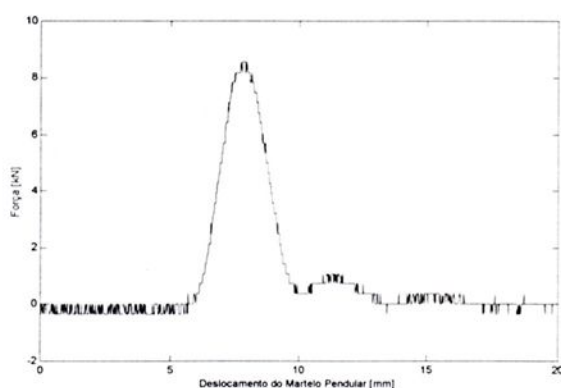


(b)

Figura 4.11 - Curvas força vs tempo para o alumínio 7050 obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.

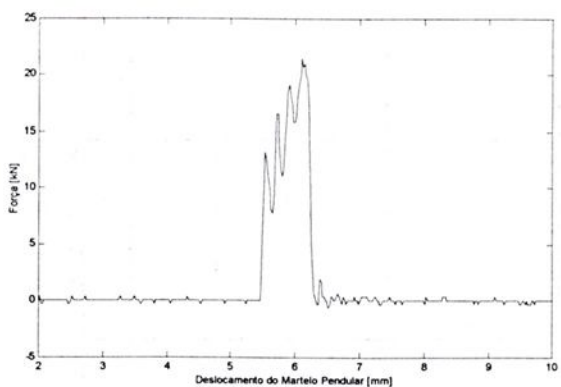


(a)

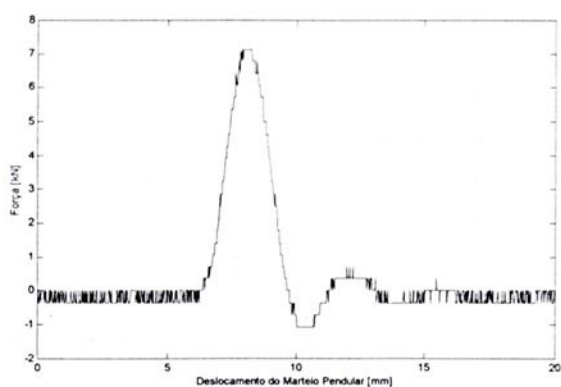


(b)

Figura 4.12 - Curvas força vs deslocamento para o aço SAE 1040 obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.

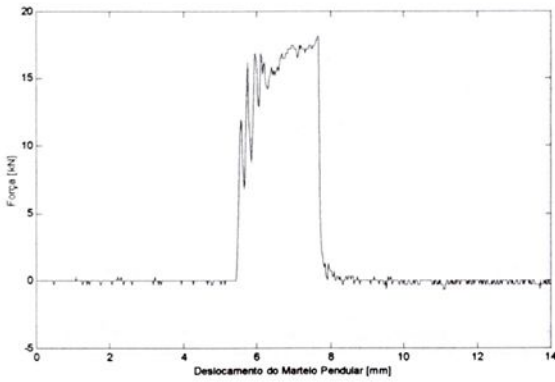


(a)

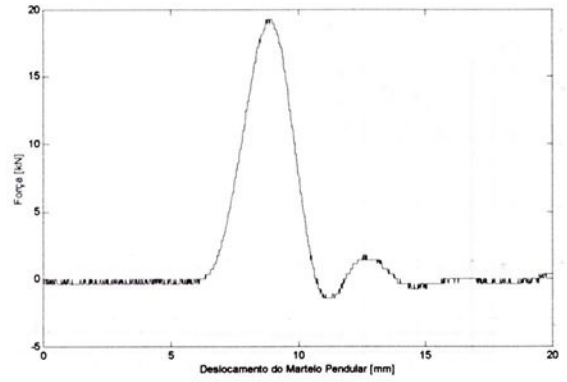


(b)

Figura 4.13 - Curvas força vs deslocamento para o aço SAE 8640 obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.

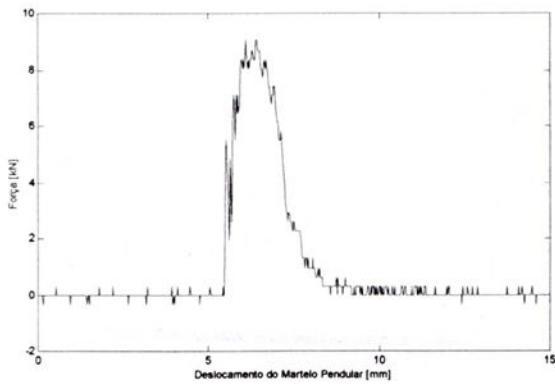


(a)

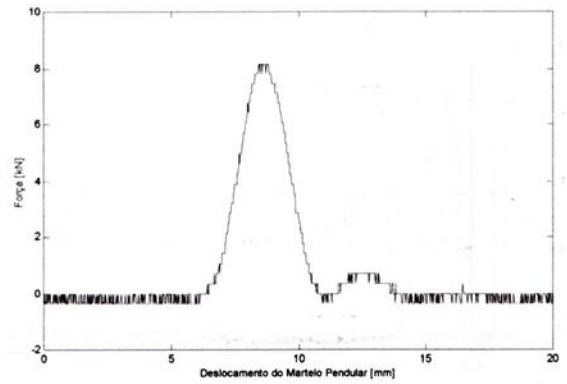


(b)

Figura 4.14 - Curvas força vs deslocamento para o aço 300M obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.

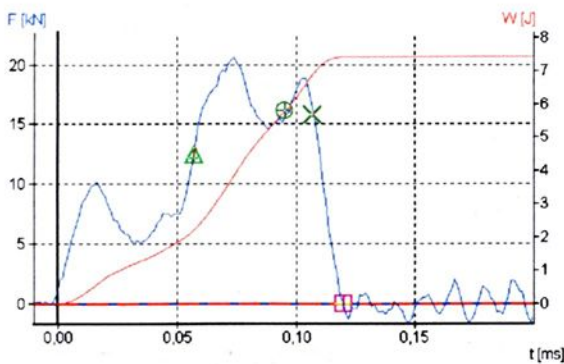


(a)

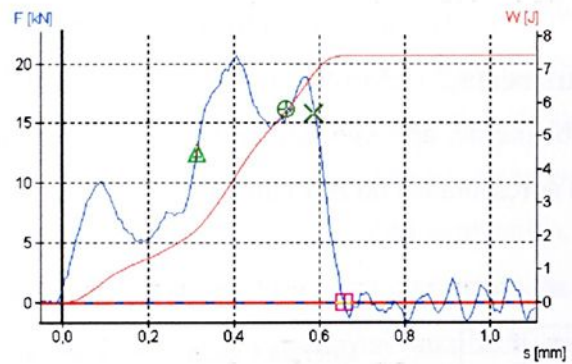


(b)

Figura 4.15 - Curvas força vs deslocamento para o alumínio 7050 obtidas pelos sistemas (a) PCB e (b) SENSORTEC.



(a)



(b)

Figura 4.16 - Curvas (a) força vs tempo e (b) força vs deslocamento para o aço SAE 8640 obtidas pelo sistema INSTRON WOLPERT. As curvas também mostram o comportamento da energia absorvida W[J].



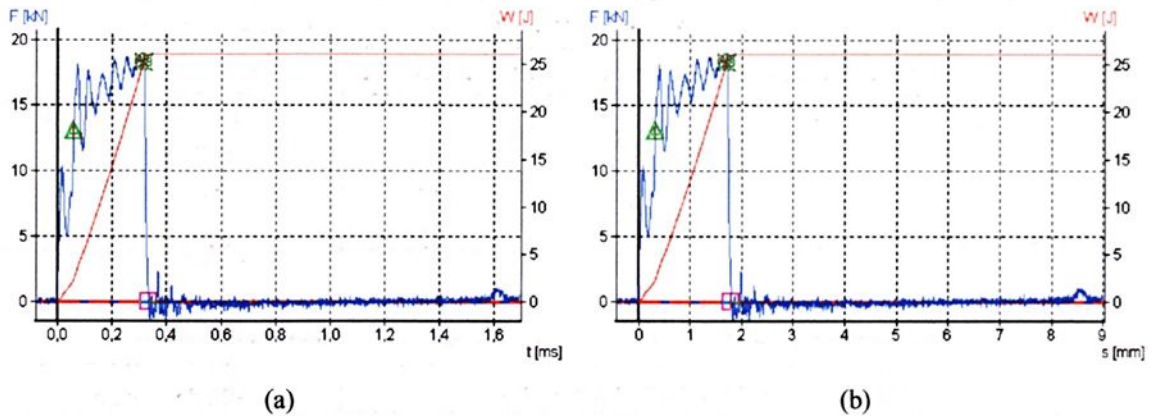


Figura 4.17 - Curvas (a) força vs tempo e (b) força vs deslocamento para o aço 300M obtidas pelo sistema INSTRON WOLPERT. As curvas também mostram o comportamento da energia absorvida W[J]

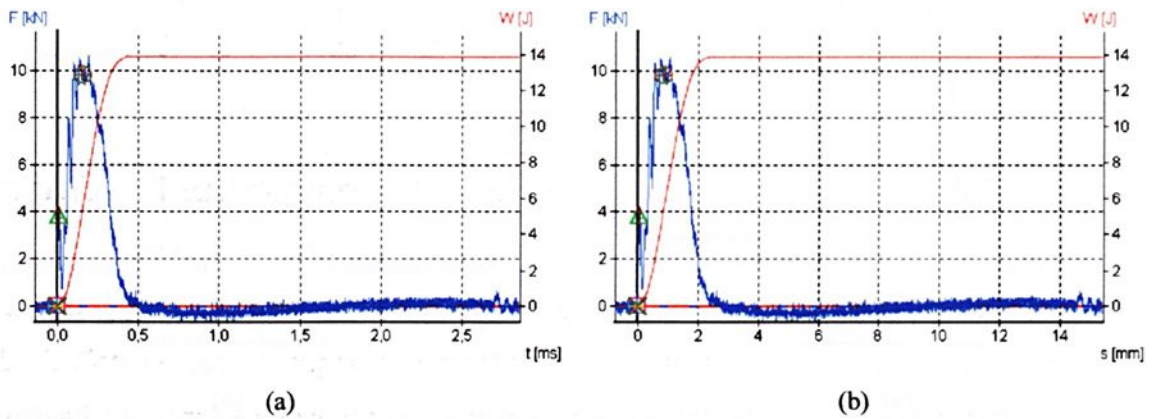


Figura 4.18 - Curvas (a) força vs tempo e (b) força vs deslocamento para o alumínio 7050 obtidas pelo sistema INSTRON WOLPERT. As curvas também mostram o comportamento da energia absorvida W[J]

As diversas informações que podem ser extraídas das três configurações de instrumentação são reunidas na Tabela 4.4 a 4.6. Os ensaios foram conduzidos na temperatura ambiente de, aproximadamente, 27°C. Os cálculos e resultados das incertezas de cada grandeza são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.4 - Energias medidas e calculadas [J].

Material	Energia Charpy Instrumentado			Energia Charpy Convencional	
	INSTRON EESC/USP	HECKERT - FEIS/UNESP		INSTRON EESC/USP	HECKERT FEIS/UNESP
		PCB	SENORTEC		
1040	-	17,9	20,2	-	18,1
8640	7,9	13,0	11,5	9,5	13,7
300M	27,6	36,2	48,3	30,5	33,5
Al7050	13,9	15,3	19,1	15,0	16,0

Tabela 4.5 - Forças máximas medidas dinâmica e monotonicamente [kN].

Material	Charpy Instrumentado			Ensaio de Flexão Monotônico
	INSTRON	PCB	SENORTEC	
1040	-	16,3	8,6	13,0
8640	17,3	21,1	8,5	20,7
300M	18,5	17,9	19,8	17,6
Al7050	9,8	9,7	8,2	9,5

Tabela 4.6 - Valores de tenacidade à fratura aparente [MPa.m^{1/2}]¹.

Material	Charpy Instrumentado			Ensaio de Flexão Monotônico
	INSTRON	PCB	SENORTEC	
1040	-	76,6	40,4	61,1
8640	81,3	99,2	39,9	97,3
300M	86,9	84,1	93,0	82,7
Al7050	46,1	45,6	38,5	44,6

4.3 Programa Computacional para Tratamento dos Resultados

Uma das atividades efetuadas ao longo das etapas do trabalho foi o desenvolvimento da rotina computacional intitulada “Programa Computacional Charpy Instrumentado”. A idéia inicial era elaborar uma pequena rotina para a construção dos gráficos de força em função do tempo e suas posteriores análises. Entretanto, no decorrer dos ensaios, o programa foi sendo aprimorado e cada nova idéia era incorporada na própria rotina.

Dessa forma, seu desenvolvimento ocorreu por módulos, pelos quais é possível construir 7 tipos de gráficos, calcular várias formas de energia, determinar as informações principais das curvas, tais como força máxima e tenacidade à fratura dinâmica, além de um tratamento estatístico dos resultados baseado na distribuição de probabilidades *t-student*. Procurou-se evidenciar a interface com o usuário, tentando torná-la acessível e auto explicativa.

Durante a revisão bibliográfica, foi encontrado um artigo científico que menciona a utilização de um sistema de avaliação da tenacidade à fratura dinâmica auxiliada por computador. Essa foi uma das razões que instigaram ao aprimoramento constante da rotina computacional, incluindo sua divisão para os casos de fratura dúctil e frágil. Por fim, o novo

¹ O cálculo das incertezas dos resultados encontra-se no Apêndice C.

direcionamento dado à rotina computacional foi o motivo pelo qual essa atividade paralela foi considerada como um resultado adicional deste trabalho, apresentado neste capítulo.

Algumas figuras alusivas ao programa computacional são mostradas abaixo. A construção da rotina foi baseada na linguagem matemática Matlab. Possui duas opções principais de cálculo da tenacidade à fratura dinâmica: uma fundamentada na mecânica da fratura linear elástica e outra na mecânica da fratura elasto-plástica. Maiores detalhes podem ser vistos na estrutura do programa, apresentada na Figura B.1 do Apêndice B.

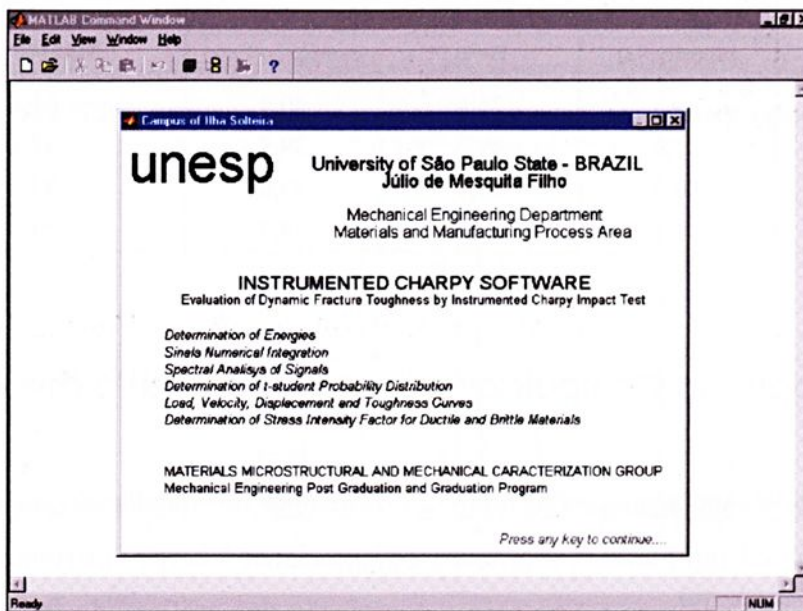


Figura 4.19 - Tela de apresentação do programa computacional Charpy Instrumentado.

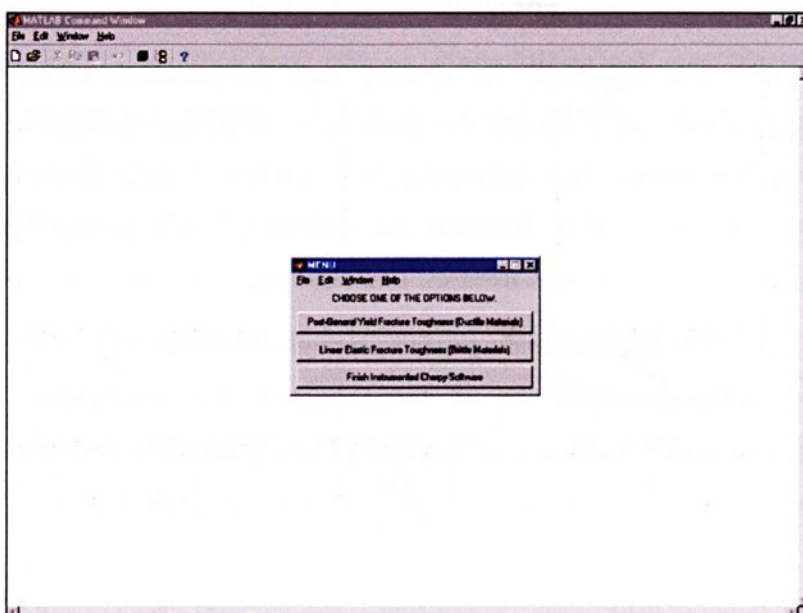


Figura 4.20 - Opções de cálculo.

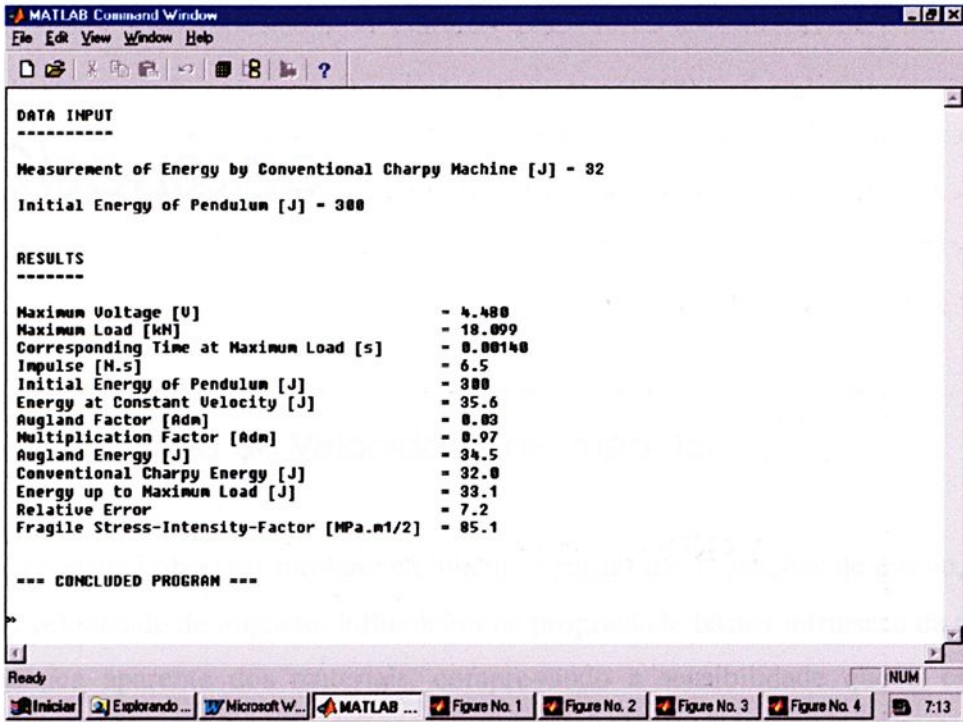


Figura 4.21 - Principais resultados obtidos das curvas força vs tempo.

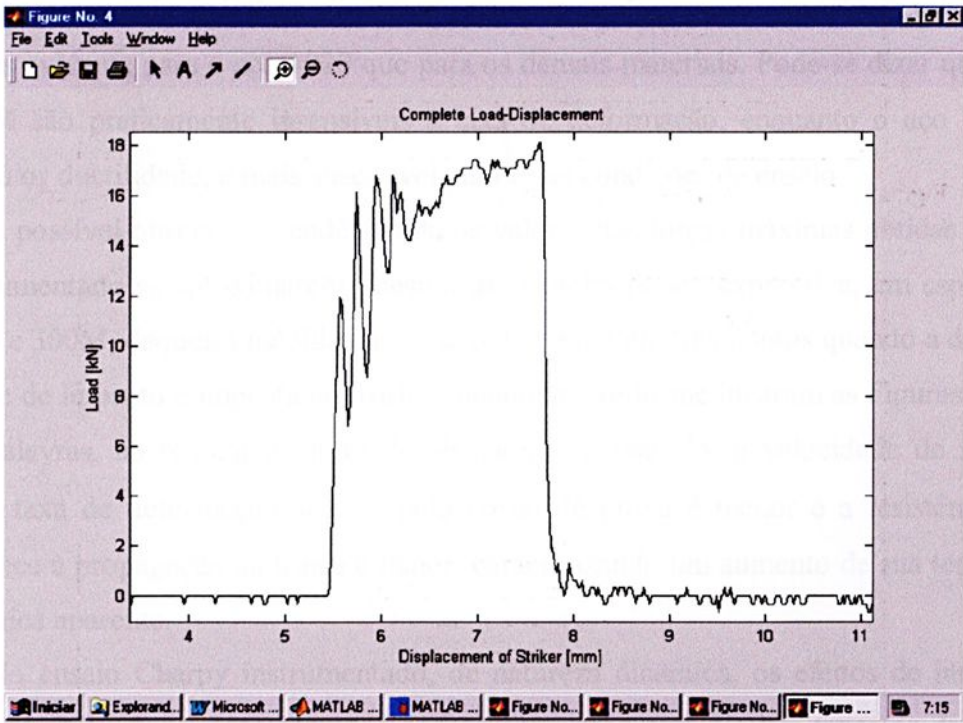


Figura 4.22 - Exemplo de uma curva força vs deslocamento.

Discussão

5.1 Influência da Velocidade de Impacto

Foi possível observar nitidamente que a alteração das condições de ensaio, por meio da variação da velocidade de impacto, influenciou na propriedade básica intrínseca da tenacidade à fratura dinâmica aparente dos materiais, comprovando a sensibilidade que o escoamento plástico (mais sensível) e a fratura (pouco sensível) apresentam em relação à taxa de deformação.

Essa verificação pode ser ratificada avaliando-se a Figura 4.7, que apresenta a diminuição da tenacidade à fratura dinâmica aparente conforme se aumenta a velocidade de impacto, mais evidente para o aço 1020 que para os demais materiais. Pode-se dizer que os aços 1040 e 300M são praticamente insensíveis à taxa de deformação, enquanto o aço 1020, por apresentar maior ductilidade, é mais suscetível para estas condições de ensaio.

É possível observar a tendência de os valores das forças máximas obtidas do ensaio Charpy instrumentado se aproximarem, mesmo de maneira pouco expressiva, em especial para os aços 1040 e 300M, daqueles medidos no ensaio de flexão em três pontos quando a diminuição da velocidade de impacto é imposta ao martelo pendular, conforme ilustram as Figuras 4.1 à 4.3. Em outras palavras, ao reduzir a altura de abandono do martelo, a velocidade de impacto é diminuída, a taxa de deformação sofrida pelo corpo de prova é menor e a resistência que o material oferece à propagação da trinca é maior, caracterizando um aumento de sua tenacidade à fratura dinâmica aparente.

No ensaio Charpy instrumentado, de natureza dinâmica, os efeitos de inércia e de ressonância mecânica devem ser considerados devido justamente às altas taxas de deformação. No ensaio de flexão em três pontos, o corpo de prova é submetido à uma aplicação gradual da força. Os efeitos da inércia e da ressonância mecânica podem ser desprezados neste caso.

Portanto, em decorrência do exposta acima, a força necessária para promover o escoamento generalizado ou a fratura completa do corpo de prova no ensaio de flexão em três pontos pode ser considerada como um parâmetro de referência, em que a força máxima medida no ensaio Charpy instrumentado deverá se estabelecer próximo deste valor devido aos diferentes tipos de carregamento.

5.2 Influência da Variação Microestrutural dos Materiais

O ensaio Charpy instrumentado mostrou nitidamente que a variação microestrutural dos corpos de prova determinou o comportamento dúctil ou frágil dos materiais ensaiados. Quando a força impulsiva é aplicada no material pelo martelo pendular, a plasticidade começa a agir, na região à frente do entalhe, no sentido de tentar controlar a propagação da trinca.

Quanto maior a ductilidade do material, maior é o efeito do escoamento plástico sobre o mecanismo de propagação da trinca, atuando no sentido de retardar o processo de fratura. É por essa razão que há uma diferença significativa das amplitudes dos sinais apresentados nas Figuras 4.4 à 4.6, mesmo considerando a limitação do tempo de resposta do condicionador de sinais, a qual será discutida nos itens 5.3 e 5.4.

Em outras palavras, por ter maior capacidade de redistribuir tensões para essa condição de ensaio, o corpo de prova constituído de aço ao carbono 1020 ofereceu maior resistência ao processo de fratura, o que acabou por aproximar os tempos de fratura e de resposta do condicionador de sinais, embora se saiba que o emprego desse equipamento nesta etapa do trabalho não se mostrou plenamente adequado em função de suas próprias limitações, apresentadas no Capítulo 3, e do caráter dinâmico em que o ensaio é executado.

Sob a ótica do comportamento mecânico dos metais, sabe-se que a tenacidade à fratura dinâmica e a energia Charpy representam a propriedade da tenacidade desses materiais, seja ela fundamentada na energia absorvida até a fratura, representada pelo ensaio Charpy convencional, ou a resistência à extensão da trinca, representada pelo ensaio Charpy instrumentado.

A diferença entre os dois casos consiste unicamente em que apenas o segundo deles permite correlacionar a tenacidade ao desempenho em serviço, por intermédio do nível de tensões. Assim, propõe-se que todos os valores de tenacidade à fratura dinâmica aparente carecem de maiores amplitudes, mesmo sabendo-se que o aço ao carbono 1020 possui maior

plasticidade em relação aos aços 300M e 1040, nessa ordem. Portanto, os resultados de tenacidade à fratura dinâmica aparente medidos não possuem significado quantitativo, não podendo ser aplicados diretamente ao projeto estrutural. Eles foram mantidos nos resultados, mesmo totalmente errôneos, por fornecerem maiores dados à avaliação do sistema de medição.

5.3 Avaliação do Sistema de Medida Utilizado na Etapa 1

O ensaio Charpy instrumentado utilizando extensometria e o sistema de aquisição de sinais proposto se mostraram satisfatórios dependendo da microestrutura ensaiada. Para materiais tenazes, representado pelo aço SAE 1020, o sistema se apresentou mais eficiente, pois o escoamento plástico nesses casos age com maior intensidade no sentido de retardar o mecanismo da propagação da trinca e, conseqüentemente, aumenta o tempo de interação entre o martelo pendular e o corpo de prova, favorecendo o condicionador de sinais, pois apresenta um tempo de resposta considerado grande para entradas impulsivas, tal como a ocorrida no ensaio Charpy instrumentado.

Para materiais de menor tenacidade, representado pelo aço SAE 1040 e 300M, o sistema de medidas degenera de maneira significativa o sinal da força no tempo devido à grande diferença entre o tempo de resposta do próprio sistema e o tempo do processo de fratura. Para estes casos, por apresentar maior fragilidade, os materiais oferecem menos resistência à extensão da trinca.

Com base nas definições da instrumentação e análise de sinais, foi possível determinar a frequência de resposta do condicionador de sinais mediante o levantamento de sua curva de resposta. Os valores encontrados mostram que o desempenho do condicionador e amplificador de sinais se torna bastante comprometido quando aplicado na aquisição de sinais dinâmicos. Na realidade, esse fato pode ser melhor compreendido considerando o conceito de tempo de resposta do condicionador de sinais.

Analisando o tempo de resposta do condicionador, verifica-se que ele é grande para o caso de aplicações dinâmicas, tal como no ensaio Charpy instrumentado, em que o tempo do fenômeno é pequeno. Esse valor do tempo de resposta causa uma atenuação da amplitude do sinal degenerando o verdadeiro sinal e, conseqüentemente, impossibilitando a determinação correta da força máxima. Dessa forma, quanto maior o tempo de resposta do condicionador, maior é a atenuação do sinal real impulsivo.



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 vs tempo apresentadas nos itens 4.1.1 e 4.1.2, obviamente considerando um menor incremento de tempo que o proporcionado pelo atual condicionador de sinais, devido a um menor tempo de resposta.

Isto posto, nesta primeira etapa do trabalho não foi possível isolar com clareza os efeitos da resposta mecânica dos materiais ensaiados das limitações da arquitetura de medição. Não se permite afirmar com convicção se os resultados da tenacidade à fratura dinâmica aparente obtidos do ensaio estão extremamente baixos em virtude do comportamento mecânico dos materiais ensaiados ou devido à limitação do sistema de medida. Esses efeitos foram melhor compreendidos na segunda etapa do trabalho.

5.4 Avaliação do Sistema de Medida Utilizado na Etapa 2

Da mesma forma que na etapa 1, os propósitos da variação microestrutural imposto aos corpos de prova Charpy na etapa 2 foram, como já é sabido, um artifício para se estudar o comportamento do sistema de medida. Empregou-se os novos materiais como meio para ampliar a investigação da performance dos transdutores, sejam os piezoelétricos ou os extensômetros posicionados no martelo pendular.

A aplicação de extensômetros elétricos, utilizados neste trabalho, para medir a força de impacto proveniente da interação entre corpo de prova Charpy e martelo pendular apresenta algumas implicações. Extensômetros elétricos de resistência podem ser empregados na medida da força de impacto, desde que se enquadrem em duas premissas importantes, isto é, apresentem um alto fator de sensibilidade e se posicionem adequadamente nas partes envolvidas, para minimizar os efeitos vibratórios intrínsecos ao fenômeno.

O martelo pendular construído para compor o transdutor baseado em técnicas extensométricas, segundo as considerações acima, não apresentava estas características adequadamente desejáveis. A sensibilidade à deformação igual a 2,06 representa um valor comum que poderia ser maior para esta aplicação.



Embora o martelo tenha se mostrado altamente sensível, devido ao posicionamento dos extensômetros em ponte completa na superfície de um furo localizado no cutelo próximo à área de impacto, os níveis de oscilações para esta constituição podem ser potencializados, causando interferências no sinal medido. Mesmo nestas condições em que não houve uma preocupação inicial em isolar os efeitos inerciais, os sinais obtidos pelo martelo pendular não apresentaram níveis de oscilação acentuados, possivelmente devido à ineficiência do condicionador de sinais em não fornecer resposta rápida perante entradas impulsivas.

A utilização de transdutores piezoelétricos como forma alternativa de medida da força de impacto no ensaio Charpy instrumentado apresentou, em geral, resposta dinâmica melhor que o martelo pendular instrumentado. As amplitudes e os perfis dos sinais força vs tempo sustentam esta diferença, haja visto que oscilações foram captadas e uma classificação clara dos sinais pode ser efetuada pela norma ISO 14.556, conforme ilustra a Figura 2.19 constante do Capítulo 2.

Entretanto, é difícil distinguir a origem destas oscilações para este estudo, se bem que a maioria das referências nesta área de estudo associa este comportamento dos sinais às oscilações inerciais. Em todo caso, essas oscilações, como mostram as Figuras 4.8 a 4.18, podem conter várias combinações, tais como efeitos do processo de deformação, avanço da trinca ou mesmo originado pelo impacto das partes envolvidas.

Apesar de os resultados alcançados pelos transdutores piezoelétricos serem mais animadores, a técnica adotada na fixação desses elementos deve ser reavaliada. Problemas envolvendo o tamanho relativamente grande da área de contato que recebe o impacto e desgastes foram identificados e observados durante a condução dos ensaios, especialmente quando da aplicação de corpos de prova dúcteis com tenacidade acima de 200J.

Existem transdutores de impacto no mercado de tamanhos reduzidos e de mesmo fundo de escala que os utilizados neste trabalho, além de apresentarem opções quanto ao tipo de material submetido ao impacto. Assim sendo, para minimizar e até evitar atritos, pode-se alterar o alojamento da base de apoio dos corpos de prova, atribuindo proteção frontal aos transdutores ou adquirindo transdutores com áreas de contato do impacto em forma de placas facilmente intercambiáveis.

A utilização de condicionadores de frequências de respostas distintas permitiu verificar algumas observações. O medidor de deformação e deslocamento modelo TMDE, empregado no condicionamento e amplificação dos sinais captados pelo martelo pendular, não é capaz de acompanhar plenamente o fenômeno da fratura ocorrido no ensaio Charpy. Devido ao



seu grande tempo de resposta, geralmente apresenta a mesma forma dos sinais força vs tempo, isto é, com uma parcela de subida e descida praticamente simétricos em relação a uma linha vertical imaginária que passa pelo ponto máximo da função, podendo conter oscilações de maiores amplitudes no final do impacto, como ilustram as Figuras 4.8 a 4.15. Além disso, esses sinais não são passíveis, num primeiro momento, de serem classificados segundo a norma ISO 14.556.

Essa limitação pode estar causando alterações no formato dos sinais e, conseqüentemente, conduzindo às diferenças mais acentuadas no cálculo das energias por meio das curvas e no valor das forças máximas medidas, que são mostradas nas Tabelas 4.4 e 4.5. Todavia, para materiais de comportamento mais dúcteis, os sinais não apresentaram queda das amplitudes, como é o caso do aço 300M em relação aos demais, o que não descarta totalmente o emprego deste condicionador de sinais.

Os condicionadores PCB utilizados junto aos transdutores piezoelétricos se mostraram mais eficientes, tendo em vista que apresentam freqüência de resposta da ordem de 100 vezes maior, ou seja de 100kHz. Vale salientar que esse valor de freqüência de resposta representa a indicação mínima aceitável especificada pela norma ISO 14.556.

Observou-se que os resultados medidos neste sistema não diferenciaram daqueles obtidos da máquina de ensaio Charpy instrumentado INSTRON WOLPERT. Veja as Tabelas 4.4 e 4.5. Em princípio, este fato sugere que condicionadores operando acima de 100kHz não trazem diferenças quanto à resposta dinâmica aplicada ao ensaio Charpy instrumentado.

Entretanto, esta condição de maior velocidade de aquisição dos sinais aparentemente permite uma maior exploração do comportamento da curva e não do resultado global que ela fornece, isto é, da energia calculada e dos valores de força, seja de escoamento generalizado, força máxima ou de propagação da trinca. Entende-se que essa velocidade de resposta conduz a uma captação mais pormenorizada da pontos de força no tempo, aumentando a quantidade de detalhes e informações, como por exemplo oscilações. Veja as Figuras 4.16 a 4.18.

Portanto, o emprego e comparação de três sistemas de instrumentação Charpy representou uma fonte de avaliação ampla e proveitosa. Os resultados esperançosos alcançados pelos transdutores piezoelétricos PCB, mesmo se defrontando com problemas de ordem prática, e aqueles comparativos obtidos com o sistema INSTRON WOLPERT não ofuscam totalmente os resultados medidos pelo sistema da SENSORTEC, utilizando o medidor de deformação e deslocamento modelo TMDE.



Para certos tipos de materiais ensaiados, em que o tempo de interação entre o corpo de prova e o martelo pendular seja maximizado, o TMDE proporciona resposta aceitável, com pouca ou nenhuma atenuação do sinal. Todavia, detalhes do comportamento da curva força vs tempo, como força de escoamento generalizado e forças associadas à propagação da trinca praticamente não são identificáveis.

Esse problema se tornou evidente e foi melhor compreendido quando o TMDE foi empregado na etapa 1 do trabalho. Sua grande limitação no tempo de resposta forneceu resultados críticos para os materiais mais frágeis, que podem ser vistos nas Figuras 4.4 a 4.6. Para estes casos, as forças máximas resultaram em amplitudes tão reduzidas que os valores de tenacidade à fratura dinâmica calculados não representam a verdadeira resposta do corpo de prova, perdendo completamente, os resultados, sentido prático.

Um tratamento estatístico foi aplicado em todos os processos de medidas realizados no decorrer do trabalho. O Apêndice C procurou caracterizar as medições efetuadas com base nos valores médios e suas respectivas incertezas. Segundo algumas referências adotadas, 3 corpos de prova Charpy indicam a quantidade mínima que permite efetuar a análise das incertezas com certa margem de confiabilidade dos resultados. No entanto, sugere-se que esta quantidade seja aumentada para, pelo menos, 6 amostras, especialmente no ensaio Charpy instrumentado, pois os níveis de dispersão tendem a diminuir, desde que as condições de ensaio sejam devidamente controladas.

A sensibilidade do ensaio proporcionada pelos aspectos construtivos do corpo de prova leva a uma certa dispersão dos resultados, tanto os de energias como os valores de forças medidos. Qualquer alteração no perfil ou dimensão do entalhe de um corpo de prova para outro, aliada a sua condição microestrutural, pode provocar diferenças significativas. Associada a sensibilidade promovida pelos corpos de prova, existe ainda a estabilidade do sistema eletrônico de medição. Uma quantidade de segurança sempre maior de amostras deve ser fabricada, de modo que testes de ajustes dos equipamentos sejam efetuados e previstas possíveis perdas de amostras devido a resultados que fogem à tendência geral das medições.

É possível observar no Apêndice C que alguns resultados de incerteza relativa ocorreram com valores percentuais que merecem devida atenção e cuidado, especialmente as medidas de energia Charpy convencional e de tenacidade à fratura dinâmica. Sugere-se que este comportamento, captado pelo tratamento estatístico adotado, deve-se à fabricação do entalhe e às variações locais da microestrutura.



O entalhe representa o concentrador de tensões e é um dos pontos mais críticos do ensaio Charpy. Alterações no ângulo, na profundidade e no raio de ponta, advindas de problemas imprevistos na fabricação, como imperfeições dos dentes da fresa e vibrações excessivas ocorridas na usinagem, podem gerar diferentes entalhes para o mesmo lote de material. Para materiais dúcteis ou submetidos a temperaturas altas durante o ensaio Charpy, este efeito não é expressivo, mas para materiais frágeis, essas alterações aumentam sobremaneira a sensibilidade do ensaio, favorecendo a ocorrência de dispersões dos resultados.

Ademais, os materiais adotados para compor os corpos de prova e fornecer um meio de estudo sobre as instrumentações foram todos considerados na condição como recebidos. Esse fato pode trazer implicitamente um agravante adicional, pois não se conhece com firmeza a história ou a corrida do material bruto. Assim, o processo de obtenção ou tratamentos termomecânicos, como laminação e recozimento, podem também ter contribuído na amplitude das dispersões. Garantir que estas dispersões são devidas a esses efeitos ou qual parcela deles tem maior participação nas dispersões encontradas é uma tarefa difícil.

Este trabalho não tinha como propósito esgotar o assunto acerca da instrumentação Charpy, o que é sabidamente improvável num período de estudo proporcionado por um curso de mestrado. Avançar um pouco mais em direção ao entendimento e implicações deste tipo de implementação foi na realidade a grande meta proposta. Há muito ainda a se investigar nessa área, embora se saiba que vários pesquisadores, desde os anos 60, tenham se dedicado para este fim e que tenha surgido recentemente a normalização ISO, sugerindo metodologias de instrumentação.

A própria norma apresenta-se flexível neste aspecto, não determinando, por exemplo, os tipos de transdutores e condicionadores de sinais que podem ser utilizados ou mesmo especificando o cálculo da tenacidade à fratura dinâmica. Além disso, deixa lacunas, pois não apresenta os critérios adequados para os ajustes matemáticos das curvas e nem as maneiras para a determinação das forças que representam o processo de propagação da trinca.



Conclusões

Apresentou-se neste trabalho um estudo experimental do ensaio Charpy instrumentado. Foram investigados alguns parâmetros que poderiam fornecer informações quanto ao entendimento dos sistemas de medida adotados, tais como a taxa de carregamento e tipo de microestrutura dos corpos de prova.

O trabalho foi dividido em duas etapas, as quais dependeram do tipo de instrumentação empregado. A etapa 1 consistiu na aplicação da técnica extensométrica para compor a célula de carga. Os extensômetros, em ponte de *Wheatstone*, foram alojados na superfície de um furo executado no cutelo do martelo pendular. A etapa 2 compreendeu na aplicação de transdutores piezoelétricos posicionados na base de apoio dos corpos de prova. As seguintes conclusões, portanto, são enumeradas abaixo.

- a célula de carga, apesar de apresentar boa sensibilidade e excelente linearidade, não mostrou-se eficaz em sua plenitude. Conforme menciona a norma ISO 14.556, poderia ser configurada por apenas dois extensômetros ativos posicionados em lados opostos do cutelo. Os outros dois passivos poderiam ser colados em qualquer parte que não experimentasse os efeitos de vibração inerentes ao ensaio. Além disso, melhores resultados seriam alcançados se extensômetros com fatores de sensibilidade maiores fossem empregados.
- em geral, as forças máximas, medidas apresentaram boa concordância com os valores esperados e atribuídos como referência. Um exemplo típico, dentre os outros resultados vistos na Tabela 4.5, é o da liga de alumínio 7050, em que a força medida monotonicamente foi de 9,5kN e as forças medidas dinamicamente foram de 9,8kN e 9,7kN, obtidas respectivamente pelas máquinas INSTRON WOLPERT e pelo sistema piezoelétrico empregado neste trabalho. As exceções são as forças máximas determinadas na etapa 1 do trabalho, em que o aço SAE 1040, por exemplo, apresentou, para a condição padrão de ensaio, uma força máxima dinâmica de 0,4kN, contra o valor monotônico de referência de

13kN. A frequência de resposta excessivamente baixa do condicionador de sinais atenuou de forma expressiva a amplitude dos sinais medidos nesta etapa, como pode ser observado na Tabela 4.2.

- a análise dos resultados das forças máximas, especialmente para os materiais caracteristicamente frágeis, indica que o tempo de resposta do condicionador de sinais exerce grande influência nos resultados, uma vez que esses valores se mostraram bem inferiores aos medidos monotonicamente, como é o caso do aço SAE 1040 e 300M utilizados na etapa 1 do trabalho.
- os dados de energia medida pela máquina e calculada pela curva força vs tempo apresentaram menor correspondência, principalmente no caso da aplicação de extensômetros elétricos de resistência. O condicionador de sinais pode ser a fonte dessa diferença, pois afeta o formato das curvas e também o valor da energia calculada.
- o sistema de medida empregando extensômetros elétricos de resistência, como transdutor de força, e o correspondente condicionador de sinais, ambos utilizados nas etapas 1 e 2, demonstrou ser adequado dependendo da microestrutura ensaiada. Para materiais muito frágeis, o sistema não se mostra capaz de acompanhar o fenômeno da fratura, causando diminuições na amplitude das curvas e maiores diferenças entre energia convencional e calculada pelo sinal força vs tempo.
- o sistema de medida baseado em transdutores de força piezoelétricos e condicionadores de sinais de alta frequência, empregado na etapa 2 do trabalho, mostrou ser uma forma alternativa e confiável para a medida da força ao longo do tempo de impacto. No entanto, ajustes de suas instalações na base de apoio dos corpos de prova necessitam ser aperfeiçoados.

6.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

O estudo acerca da instrumentação da máquina de ensaio Charpy convencional traz consigo, além de suas complexidades e desafios naturais, uma gama de atividades quase que infindáveis. O presente trabalho concentrou-se, num primeiro momento, no emprego de princípios de extensometria para promover a aquisição dos sinais de impacto. Em seguida, transdutores de força piezoelétricos foram utilizados como metodologia alternativa, de modo que pudesse fornecer outros subsídios à melhor compreensão do fenômeno da fratura ocorrido no ensaio aliado ao sistema de aquisição aplicado.

No decorrer da realização dos testes experimentais, com suas conseqüentes discussões e análises, novas idéias foram surgindo, as quais podem ser empreendidas em futuros trabalhos. A seguir são apresentadas algumas das recomendações e propostas de atividades que podem enriquecer e dar continuidade ao trabalho desenvolvido até o momento.

- estudar o ensaio Charpy instrumentado recorrendo-se aos procedimentos estabelecidos pela normalização vigente, recém divulgada pela ISO, norma nº 14.556.
- continuar o estudo da instrumentação utilizando transdutores piezoelétricos, fixados na base de apoio dos corpos de prova, devidamente protegidos contra desgastes causados pelo atrito com os corpos de prova.
- investigar a influência da variação do comprimento dos corpos de prova nos resultados da tenacidade à fratura dinâmica, quando do emprego de transdutores piezoelétricos na base de apoio dos corpos de prova. Esse fato poderia ser estudado, uma vez que as áreas de contato entre os transdutores e os próprios corpos de prova são relativamente pequenas. Assim, um aumento do comprimento dos corpos de prova, poderia permitir melhor acomodação e posicionamento destes, sem possivelmente alterar os resultados de força máxima e, conseqüentemente, de tenacidade à fratura dinâmica.
- executar o ensaio Charpy instrumentado recorrendo-se a corpos de prova Charpy-V pré-trincados, como os utilizados em ensaios de mecânica da fratura monotônica.



- adicionar ao sistema de medida da força de impacto medidores do deslocamento linear ou angular do martelo pendular, recorrendo-se, por exemplo, a células fotoelétricas, potenciômetros ou *encoders*, para que medidas experimentais e numéricas da variável deslocamento sejam investigadas, comparadas e incorporadas nas curvas de força para o cálculo das energias de fratura.
- efetuar ensaios com corpos de prova submetidos a variações de temperatura.
- simular os níveis de deformação do cutelo em *software* de análise numérica e comparar com resultados experimentais, quando utilizar princípios de extensometria na composição da célula de carga.
- utilizar extensômetros com *gage factor* maior que 2. Quanto maior o fator de sensibilidade do extensômetro, maior é sua adequação para carregamentos dinâmicos.
- efetuar o tratamento estatístico dos resultados considerando não somente as medidas de dispersão usuais e nem a combinação das incertezas, mas também o efeito da propagação dos erros de medida por meio dos elementos que compõem os sistemas de medição.
- realizar os ensaios monotônico e dinâmico de tenacidade à fratura em materiais de pouca sensibilidade à taxa de carregamento e comparar os resultados obtidos. Trata-se de uma maneira de se avaliar os valores de tenacidade à fratura dinâmica medidos por conta do ensaio Charpy instrumentado.
- executar ensaios Charpy instrumentado em materiais alvo de estudos de caracterização mecânica recentes, tais como aplicados na indústria aeronáutica, utilizados em vasos de pressão ou em reatores nucleares.



Determinadas modificações podem ser implementadas com a finalidade de aperfeiçoar a metodologia experimental. Algumas delas são apresentadas abaixo.

- projetar e construir dispositivo de fixação do martelo pendular, que possua praticidade suficiente e fácil manuseio por uma única pessoa, para que ensaios sejam efetuados utilizando-se diversas velocidades de impacto, além daquelas permitidas pela máquina.
- controlar a usinagem dos entalhes quanto ao seu formato, dimensões e acabamento superficial no projetor de perfil e no rugosímetro, pois qualquer alteração dessas variáveis favorece a flutuação das medições de força, dificultando a interpretação dos resultados.
- aperfeiçoar o sistema de fixação do transdutor piezoelétrico na base de apoio dos corpos de prova, uma vez que ruídos contidos no sinal podem ter origem mecânica, devido à má fixação das partes.
- modificar o programa computacional utilizado para tratamento dos resultados, aprimorando ainda mais a interface com o usuário e implementando filtros para minimizar oscilações.
- implementar, no programa computacional, a técnica da mudança da taxa de variação relativa da compliância, empregada na determinação da força de escoamento generalizado para os casos de fratura dúctil.
- aprimorar o sistema de fixação do cutelo no procedimento de calibração monotônica da célula de carga, de modo que se aumente a rigidez global do sistema e minimize deslocamentos impróprios do conjunto, para que as deformações elásticas ocorram de forma mais concentrada no cutelo.
- utilizar materiais para constituir os corpos de prova Charpy de origem segura e confiável, com certificado de qualidade do fornecedor, processo de obtenção e constituintes microestruturais discriminados e quantificados.

AGGAG, G., TAKAHASHI, K. Study of oscilation signals in instrumented Charpy impact test. **Polymer Engineering and Science**, v.36, n.17, p.2260-6, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. In:__. **Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures**. Danvers: ASTM, 1996. p.136-55. (ASTM E23-96).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for plane-strain fracture toughness of metallic materials. In:__. **Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures**. Danvers: ASTM, 1996. p.407-37. (ASTM E399-90).

BARROS NETO, B., SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. Um pouco de estatística. In:__. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da Universidade de Campinas, 1995. p.21-60.

BÖHME, W., KALTHOFF, J. F. The behavior of notched bend specimens in impact testing. **International Journal of Fracture**, v.20, p.R139-R41, 1982.

BÖHME, W. et al. Scatter of a ferritic steel in the transition region analyzed by Charpy tests and dynamic tensile tests. **Nuclear Engineering and Design**, v.188, p.149-54, 1999.

BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. Use of external reference distribution to compare two means. In:__. **Statistics for experimenters**. EUA: J. Wiley, 1978. p.21-56.

BROCH, J. T. Characteristics of vibration and shock. In:__. **The application of the Brüel & Kjaer Measuring Systems to mechanical vibration and shock measurements**. Naearum: Brüel & Kjaer, [1970 ?]. p.12-27.

- BROCH, J. T. Shock measurements and analyses. In: __. **The application of the Brüel & Kjaer Measuring Systems to mechanical vibration and shock measurements.** Naearum: Brüel & Kjaer, [1970 ?]. p.92-103.
- BROEK, D. Failure analysis and fracture mechanics. In: POWELL, G. W., MAHMOUD, S. E. (Coord.) **ASM handbook: Failure analysis and prevention.** 9.ed. Ohio: ASM, 1995. p.47-65.
- CUN-JIAN, L. Effects of temperature and loading rate on fracture toughness of structural steels. **Materials and Design**, v.21, p.27-30, 1999.
- DALLY, J. W., RILEY, W. F., McCONNEL, K. G., Sensors for transducers. In: __. **Instrumentation for engineering measurements.** 2.ed. EUA: J. Wiley, 1993. p.124-61.
- DALLY, J. W., RILEY, W. F., McCONNEL, K. G., Resistance-type strain gages. In: __. **Instrumentation for engineering measurements.** 2.ed. EUA: J. Wiley, 1993. p.211-52.
- DALLY, J. W., RILEY, W. F., McCONNEL, K. G., Force, torque, and pressure measurements. In: __. **Instrumentation for engineering measurements.** 2.ed. EUA: J. Wiley, 1993. p.253-92.
- DELFORGE, D. Y. M. **Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy.** Campinas, 1994. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas.
- DIETER, G. E. Brittle Fracture and Impact Testing. In: __. **Mechanical metallurgy.** 4.ed. London: McGraw-Hill, 1988. p.471-500.
- DOEBELIN, E. O. Generalized configurations and functional descriptions of measuring instruments. In: __. **Measurement systems: application and design.** 2.ed. EUA: McGraw-Hill, 1976. p.9-37.



FERRANTE, M. Fratura. In:__. **Seleção de materiais**. 1.ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 1996. p.131-71.

FIGLIOLA, S. R., BEASLEY, D, E. Static and dynamic characteristics of signals. In:__. **Theory and design for mechanical measurements**. 1.ed. New York: J. Wiley, 1991. p.31-62.

FIGLIOLA, S. R., BEASLEY, D, E. Measurement system behavior. In:__. **Theory and design for mechanical measurements**. 1.ed. New York: J. Wiley, 1991. p.63-104.

GONÇALVES JR, A. A. **Metrologia**. Florianópolis: UFSC, s.d. 74p.

HERTZBERG, R. W. Transition temperature approach to fracture control. In:__. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4.ed. New York: J. Wiley, 1995, p.297-323.

HOLMAN, J. P., GAJADA JR, W. J. Basic electrical measurements and sensing devices. In:__. **Experimental methods for engineers**. 3.ed. EUA: McGraw-Hill, 1981. p.89-172.

INTERNATIONAL STANDARD. **Steel - Charpy V-notch pendulum impact test - instrumented test method**. Geneva: ISO, 2000. 14p. (ISO 14556).

IRELAND, D. R. Procedures and problems associated with reliable control of the instrumented impact test. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Instrumented impact testing**. Conshohocken: ASTM, 1974. p.3-29. (Special Technical Publication, 563).

IRELAND, D. R. Critical review of instrumented impact testing. **Journal of Dynamic Fracture Toughness**, v.1, p.47-62, 1977.



- MEI, P. R., SILVA, A. L. C. Controle de qualidade. In:__. **Aços e ligas especiais**. 2.ed. Sumaré: Eletrometal Metais Especiais, 1988. p.417-39.
- MEYERS, M. A., CHAWLA, K. K. Fratura e tenacidade à fratura. In:__. **Princípios de metalurgia mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. p.127-70.
- NEWLAND, D. E. Digital spectral analysis I: Discrete Fourier transforms. In:__. **An introduction to random vibrations and spectral analysis**. 1.ed. London: Longman Group Ltda, 1975. p.113-24.
- NICHOLAS, T. et al. Material behavior at high strain rates. In:__. **Impact dynamics**. 2.ed. EUA: Krieger Publishing Company, 1992. p277-322.
- PASTOUKHOV, V. A., VOORWARD, H. C. Origem e fundamentos. In:__. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. 1.ed. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1995. p.11-44.
- PEROSANZ, F. J., SERRANO, M., MARTÍNEZ, C. et al. Cálculo de la tenacidad de fractura a través de ensayos dinámicos. **Revista Metalurgia Madrid**, v.34, p.399-406, 1998.
- POWELL, G. W. Dynamic fracture testing. In: POWELL, G. W., MAHMOUD, S. E. (Coord.) **ASM handbook: Failure analysis and prevention**. 9.ed. Ohio: ASM, 1995. p.75-81.
- QUINAN, M. A. D. **Análise de ensaio instrumentado de impacto tipo Charpy**. Belo Horizonte. 1996. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- SERVER, W. L. Impact three-point bend testing for notched and precracked specimens. **Journal of Testing and Evaluation**, v.6, p.29-34, 1978.



SCHMITT, W., SUM, D. Z., BÖHME, W. et al. Evaluation of fracture toughness based on results of instrumented Charpy tests. **International Journal of Vessel & Piping**, v.59, p.21-9, 1994.

SHOCKEY, D. A. Dynamic fracture testing. In: NEWBY, J. R. (Coord.) **ASM handbook: mechanical testing**. 9.ed. Ohio: ASM, 1995. p.259-61.

SOUZA, S. A. Ensaio de impacto em corpos de prova entalhados. In: __. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. p.99-110.

TOKIMATSU, R. C. **Influência de Parâmetros Microestruturais e Procedimentos de ensaios no comportamento mecânico de um aço de ultra resistência e baixa liga**. Campinas, 1995. 435p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas.

VIEIRA, S., HOFFMANN, R. Introdução. In: __. **Elementos de estatística**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1988. p.13-20.

VIEIRA, S., HOFFMANN, R. Medidas de dispersão. In: __. **Elementos de estatística**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1988. p.93-105.

YAMAMOTO, I., KOBAYASHI, T. Evaluation method of dynamic toughness by computer aided instrumented Charpy impact testing system. **International Journal of Vessel & Piping**, v.55, p.295-312, 1993.

Fotografias



Figura A.1 - Dispositivo de compressão dos extensômetros elétricos de resistência.

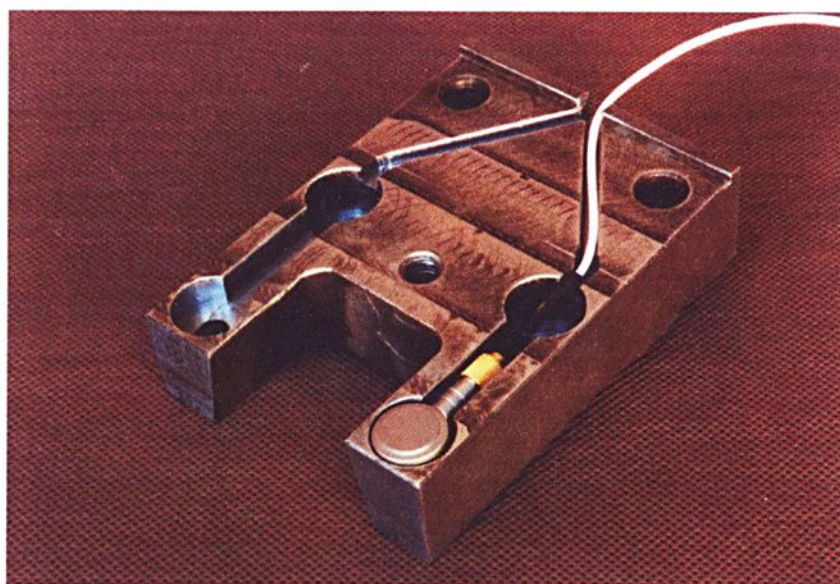


Figura A.2 - Nova base de apoio dos corpos de prova.

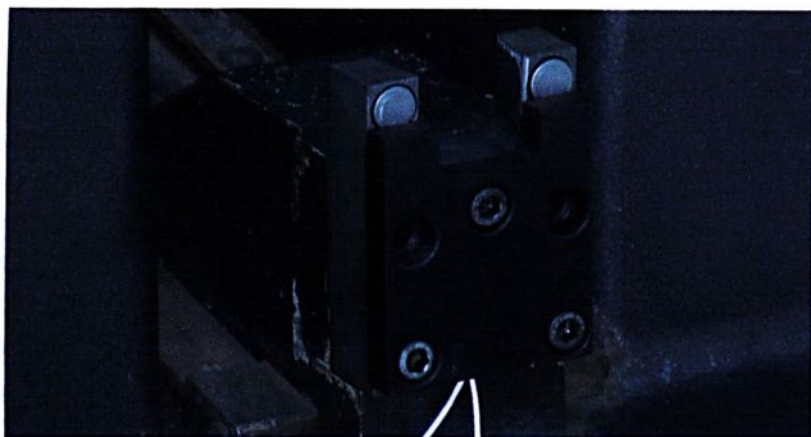


Figura A.3 - Detalhe da montagem dos transdutores piezoelétricos na estrutura da máquina.

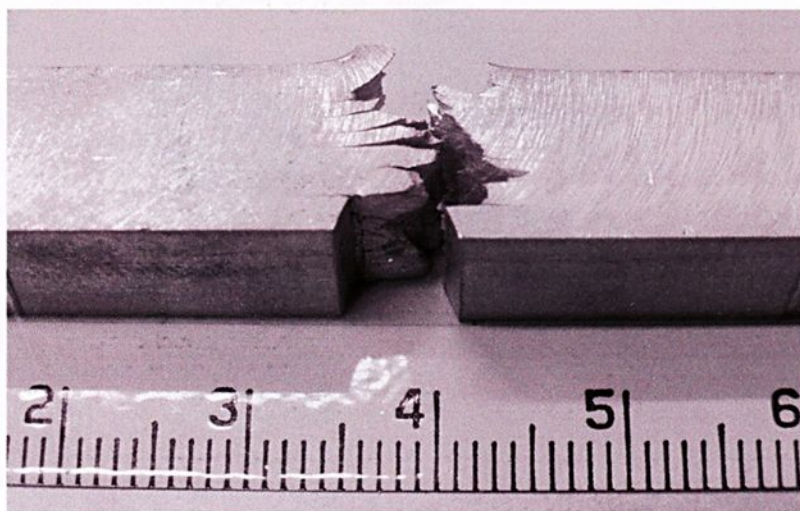


Figura A.4 - Exemplar de um corpo de prova de alumínio 7050 fraturado. Temperatura de 27°C e velocidade de impacto de 5,48m/s.

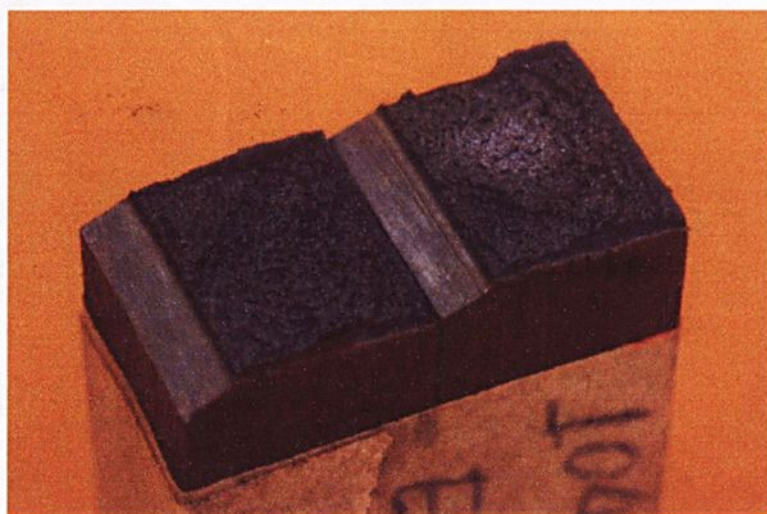


Figura A.5 - Exemplar de um corpo de prova de aço SAE 1040 fraturado. Temperatura de 27°C e velocidade de impacto de 5,48m/s.

Estrutura Computacional

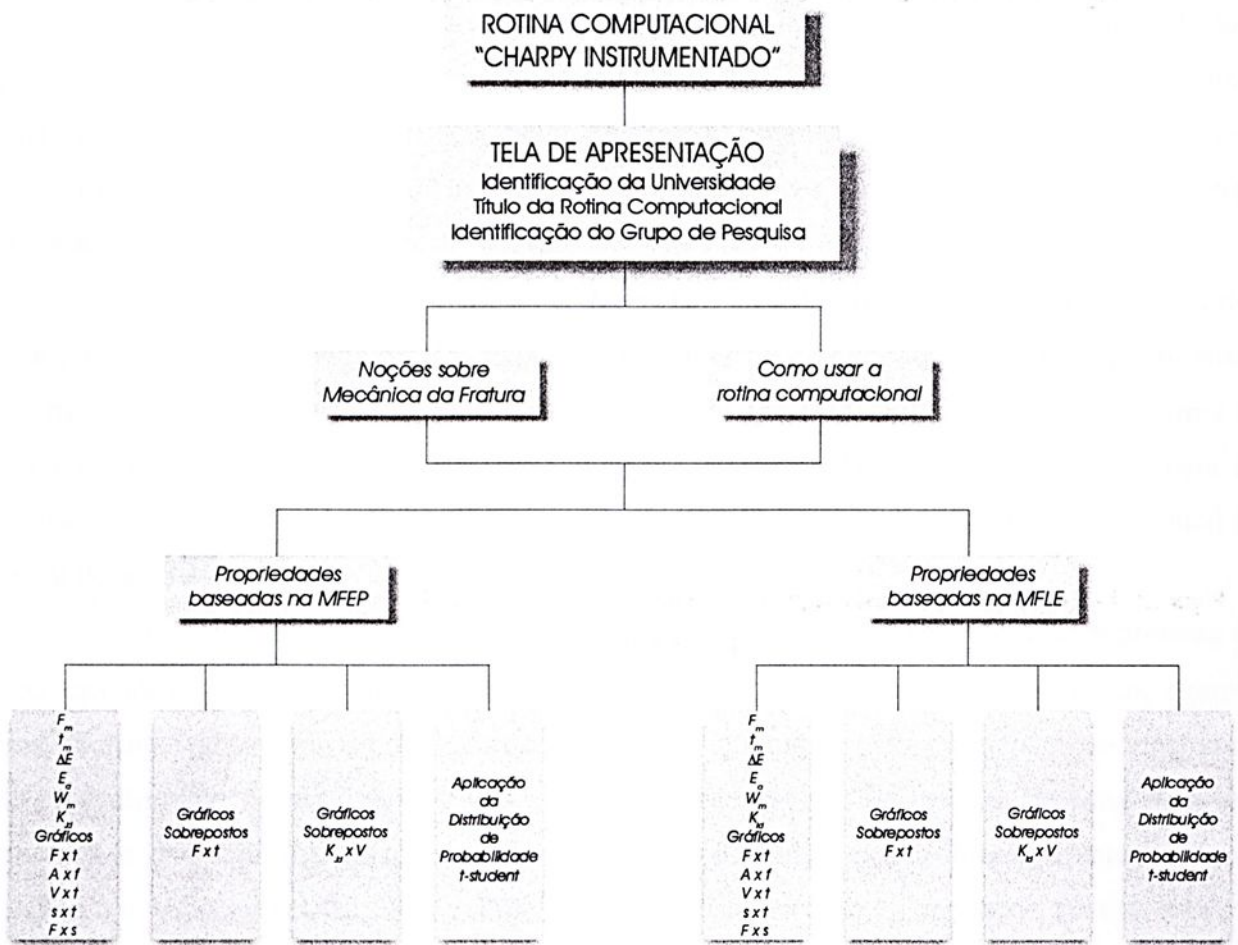


Figura B.1 - Estrutura geral da rotina computacional Charpy Instrumentado.

Nessa situação ideal, o resultado da medição poderia ser representado apenas por um número e uma unidade de medida.

É sabido, porém, que não existem sistemas de medição perfeitos. Detalhes físicos, como dimensões, geometria, material, propriedades elétricas e óticas, entre outros fatores, colaboram para os tornarem sistemas imperfeitos. Além disso, a existência de desgastes e deterioração natural das partes os classificam ainda mais nessa condição.

Efeitos externos também podem influir diretamente no resultado da medição, cuja contribuição pode ter origem tanto do sistema de medição como da variação da grandeza medida. Variações de temperatura, por exemplo, provocam alterações dimensionais nas escalas dos sistemas de medição, nas propriedades dos componentes que os compõem e nos circuitos eletrônicos, que podem alterar o resultado final medido. Outros fatores, tais como umidade, campos eletromagnéticos e variação de pressão também podem afetar os sistemas de medidas.

Por fim, tanto o operador como o procedimento de medição empregado podem ainda influenciar na medida. Aplicações de forças excessivas ou irregulares, procedimentos errôneos adotados na medição e utilização inadequada de sistemas de medidas podem levar a erros imprevisíveis. De uma forma geral, o erro de medição pode ser composto pelas seguintes parcelas apresentadas na Equação C.1.

$$E_m = E_s + E_{al} \quad C.1$$

onde E_m é o erro de medição, E_s é o erro sistemático e E_{al} é o erro aleatório. O erro sistemático é a parcela de erro que é caracterizada pela sua repetição, com certa dispersão, nos resultados das medições realizadas nas mesmas condições de operação. Sua origem pode ter causa em problemas de ajustes ou desgastes do sistema de medida, no princípio de medição empregado ou em fatores externos, tais como os provocados pelas condições ambientais.

A calibração é o procedimento pelo qual o erro sistemático pode ser detectado. No entanto, quando for detectado, deve ser compensado para possibilitar a melhoria da incerteza do resultado. O erro sistemático não foi considerado para compor as incertezas determinadas neste trabalho, pois todos os instrumentos e equipamentos de medida utilizados apresentavam certificado de calibração, com os períodos de garantia da calibração ainda não ultrapassados. As incertezas de cada variável medida serão detalhadas mais adiante.

O erro aleatório é representado por uma certa dispersão dos valores medidos em torno de um valor médio, quando uma medição é repetida várias vezes nas mesmas condições.



Essa variação dos valores ocorre de forma imprevisível, ao acaso. Diversos fatores provocam o aparecimento do erro aleatório, tais como instabilidades internas dos sistemas de medidas, variações ambientais, vibrações, flutuações de tensão elétrica e atritos, entre outros. A maneira como o erro aleatório aparece e se comporta depende de cada sistema de medição e é de difícil previsão. O erro aleatório é determinado por meio de recursos estatísticos. Neste trabalho foi caracterizado pela medida da dispersão dos resultados baseada na distribuição de probabilidades *t-student*, cuja conceituação breve é dada abaixo.

Em 1908, o químico W. S. Gosset utilizava o pseudônimo “Student” para assinar seus trabalhos. Publicou a dedução de uma curva representativa da distribuição de freqüências de uma grandeza, obtida pela razão entre a distância da média amostral à média populacional e o desvio padrão amostral (Barros Neto et al., 1995). Atualmente, prefere-se incluir a raiz quadrada do número de amostras no denominador desta razão para melhor caracterizar a distribuição.

Constatou-se que esta distribuição de probabilidades deduzida por Student representa uma variação da distribuição normal padronizada ou distribuição de Gauss e é válida para amostras aleatórias retiradas de uma população normal. Dessa forma, é possível extrair informações das amostras e associá-las às da população. Quanto menor o número de amostras, mais a distribuição *t-student* se afasta da distribuição normal, podendo ser compensada por um fator multiplicativo t_{N-1} associado a um grau de confiabilidade, que indica a probabilidade do valor médio se enquadrar no intervalo encontrado pela distribuição.

O termo $N-1$ utilizado para designar o fator t é mais comumente denominado graus de liberdade, sendo substituído pela letra grega ν em algumas referências sobre o assunto. A perda de um elemento amostral na caracterização do fator t está associada à substituição da média populacional pela média amostral (Box et al., 1978). O fator t encontra-se tabelado de acordo com o número de graus de liberdade da amostra e o nível de confiabilidade em que se espera que o valor médio, obtido de uma amostra, se enquadre no intervalo determinado pela própria distribuição. Geralmente as tabelas da distribuição *t-student* apresentam ν variando entre 1 e 200, com a confiabilidade fixada comumente em 80, 90, 95, 98, 99 e 99,5%.

A técnica da análise das incertezas classifica os procedimentos experimentais em categorias: experimentos realizados por amostragem casual simples, por amostragem sistemática ou por amostragem estratificada. No primeiro caso, todos os elementos da população têm igual probabilidade de serem selecionados para constituir a amostra (Vieira & Hoffmann, 1988). Experimentos por amostragem sistemática e estratificada referem-se, respectivamente, à seleção de dados amostrais por um sistema pré estabelecido e quando a população se apresenta

subdividida em estratos ou grupos distintos. Os cálculos das incertezas envolvidas neste trabalho foram efetuados considerando o procedimento baseado na amostragem casual simples.

Além do tipo de amostragem utilizada, deve-se considerar o tipo de grandeza medida na determinação das incertezas do resultado final. Basicamente, a grandeza a medir pode ser classificada como variável ou invariável, isto é, quando seu valor se altera em função do tempo ou quando permanece constante indefinidamente. A massa de uma determinada peça isolada do meio ambiente pode ser considerada como grandeza invariável. A temperatura ambiente de uma sala, por exemplo, pode ser considerada como uma grandeza variável.

Se essas definições forem adotadas com rigor, não se pode afirmar que existam grandezas invariáveis, pois variações ínfimas sempre ocorrem. No entanto, poderão ser consideradas grandezas invariáveis aquelas que o sistema de medição não são capazes de detectar suas variações. Neste trabalho, todas as grandezas foram classificadas como variáveis.

A determinação do resultado de uma grandeza variável quando se conhece ou se calcula a incerteza do sistema de medição para n medidas efetuadas é dada pela Equação C.2 abaixo.

$$RM = \bar{M} \pm IR \quad C.2$$

onde $IR = [ISM + \Delta M_{\text{máx}}]$ é a incerteza do resultado. Mais detalhadamente, IR pode ser explicitada como:

$$RM = \bar{M} \pm \left[\left(t_{N-1} \frac{S_a}{\sqrt{N}} \right) + |M_i - \bar{M}|_{\text{máx}} \right] \quad C.3$$

onde RM é o resultado da medição, \bar{M} é a média das medidas, ISM é a incerteza do sistema de medição, t é o fator de Student para $N-1$ graus de liberdade, S_a é o desvio padrão da amostra, N é o número de amostras ou medidas e M_i é a i -ésima medida efetuada. Nota-se na expressão acima que a incerteza do resultado é composta de duas parcelas distintas. Essa combinação é considerada, pois é difícil distinguir qual parcela da variação das medidas é devida ao erro sistemático e ao erro aleatório, justamente por não se conhecer o erro sistemático.

A maioria dos cálculos da incerteza do sistema de medição efetuados neste trabalho foram conduzidos considerando 3 e 4 amostras ou medidas. Porém, houve situações extremas em que apenas duas amostras foram ensaiadas. Para estes casos, o cálculo das incertezas por meio da



Equação C.3 passa a não ter sentido prático. Assim, o desvio padrão também representa uma adequada maneira de se avaliar a dispersão e foi adotado para compor a incerteza absoluta, mesmo com a quantidade mínima de amostras. Trata-se, por exemplo, dos resultados dos ensaios Charpy instrumentado e convencional, realizados por conta da segunda etapa do trabalho, em que disponibilizavam-se apenas dois corpos de prova do aço 1040 e da liga de alumínio 7050. Para os casos em que uma única medida de uma determinada grandeza foi realizada, considerou-se os seguintes valores de incerteza do sistema de medição (Gonçalves Jr, s.d.):

ISM = $\pm 2.IE$, para sistemas de medição com indicação analógica.

ISM = $\pm 5.IE$, para sistemas de medição com indicação digital.

onde IE é o incremento de escala do sistema de medição.

Finalmente, o *resultado final da medição* nem sempre é obtido de forma direta, tal como apresentado na Equação C.2. Na maioria dos casos, medem-se determinadas grandezas para se calcular o resultado final ou a grandeza alvo da medição, que é obtida utilizando-se expressões de recorrência, fórmulas empíricas ou equações. Nessas situações, as incertezas do resultado de cada grandeza devem ser combinadas de modo que se possa estimar a *incerteza provável* do resultado final. Assim, quando um resultado final R_f de um experimento for determinado por uma função f de grandezas X_i dado por

$$R_f = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{C.4}$$

então, a *incerteza provável do resultado final* é dada pela combinação dos efeitos das incertezas individuais das grandezas sobre o resultado final.

$$IR_{\text{prov}} = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R_f}{\partial X_i} IR(X_i) \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{C.5}$$

onde $IR(X_i)$ é a incerteza do resultado da grandeza X_i .



Esta equação é válida para grandezas estatisticamente independentes, isto é, medidas por sistemas de medição diferentes. Se houver dependência entre grandezas, ou seja, se forem medidas com o mesmo sistema de medição, estas grandezas são classificadas como estatisticamente dependentes. O cálculo da incerteza do resultado para este caso, procede somando-se as parcelas dependentes para depois elevar ao quadrado. Considere, por exemplo, que as grandezas X_1 e X_2 são estatisticamente dependentes e as demais n grandezas são estatisticamente independentes. A Equação C.5 torna-se, portanto:

$$IR_{\text{prov}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_f}{\partial X_1} IR(X_1) + \frac{\partial R_f}{\partial X_2} IR(X_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial R_f}{\partial X_3} IR(X_3)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R_f}{\partial X_n} IR(X_n)\right)^2} \quad \text{C.6}$$

Apresentam-se a seguir os cálculos das incertezas dos resultados finais de todas as medições efetuadas neste trabalho. Foram determinadas 5 propriedades mecânicas com o propósito de se caracterizar os materiais metálicos ensaiados na máquina de ensaio Charpy instrumentado. Dentre as 5 propriedades mecânicas, apenas os resultados provenientes do ensaio Charpy convencional foram obtidos de forma direta, sem a necessidade de se utilizar expressões de correspondência e combinação de incertezas. Para este caso, a Equação C.3 foi suficiente para caracterizar a incerteza da propriedade obtida.

Portanto, serão mostradas tabelas que resumem os valores calculados para cada propriedade medida. A média dessas propriedades, bem como suas incertezas serão apresentadas aqui. Entretanto, as incertezas relativas serão destacadas, pois fornecem uma medida proporcional da incerteza, isto é, em relação à média. É calculada pela razão entre a incerteza absoluta e a média da propriedade em questão.

Dureza

As medidas de dureza Vickers foram efetuadas aplicando-se uma carga de 30kgf nos corpos de prova, considerada aqui para efeito de cálculo das incertezas como valor constante do equipamento, e medindo-se as diagonais originadas pela impressão do penetrador. O procedimento seguido esteve de acordo com os estabelecidos pelo manual de operações do equipamento. A expressão de recorrência para o cálculo da dureza é dada por:



$$HV = \frac{1,8544 \cdot Q}{L^2} \quad C.7$$

onde Q é a carga aplicada e L é a medida da diagonal da impressão, dada em mm. O resultado das medidas da diagonal L foi calculado utilizando-se a Equação C.3, considerando 4 amostras e confiabilidade de 90% para cada material ensaiado. A incerteza provável do resultado final foi determinada pela Expressão C.5, que é reescrita para a diagonal L abaixo:

$$IR(HV)_{\text{prov}} = \frac{(-2) \cdot 1,8544 \cdot 30}{(\bar{L})^3} \cdot IR(L) \quad C.8$$

onde IR(L) é a incerteza associada às medições da diagonal L e \bar{L} é a média das medidas das diagonais. A tabela C.1 resume os valores médios, de incerteza absoluta e relativa da grandeza dureza para as 3 classes de materiais metálicos ensaiados na etapa 1 deste trabalho.

Tabela C.1 - Resultados finais de dureza.

Material	Dureza Média [HV]	Incerteza Absoluta [HV]	Incerteza Relativa [%]
1020	132,0	± 3,3	2,5
1040	272,3	± 7,7	2,8
300M	228,0	± 5,5	2,4

Ductilidade

A ductilidade dos materiais foi determinada com base nas medidas dos diâmetros inicial e final de corpos de prova submetidos ao ensaio de tração monotônico. Os diâmetros iniciais foram medidos uma única vez, quando da fabricação dos corpos de prova. A incerteza associada a esta variável é considerada, portanto, de 0,05mm, que corresponde ao máximo valor de incerteza para o caso de sistema de medição com indicação digital. Neste caso, utilizou-se um paquímetro digital Mitutoyo Digimatic com faixa de operação de 0,01 a 150mm. A equação para a determinação da ductilidade é apresentada a seguir:

$$\varphi = \left(\frac{D_f^2 - D_i^2}{D_i^2} \right) \cdot 100 \quad \text{C.9}$$

onde D_i é o diâmetro inicial em mm e D_f é o diâmetro final em mm.

Os diâmetros finais foram medidos posicionando-se os corpos de prova rompidos no ensaio num projetor de perfil com indicação analógica de medidas lineares, com resolução de 0,01mm. Foi possível calcular a incerteza para esta variável com base na Equação C.3, uma vez que 4 amostras de cada material foram ensaiadas. Ressalta-se que as variáveis diâmetro inicial e final são estatisticamente independentes e, por esse motivo, a expressão para estimar a incerteza provável final da ductilidade resultou em:

$$IR(\varphi)_{\text{prov.}} = 100 \cdot \sqrt{\left(\frac{-2\bar{D}_f}{D_i^3} \cdot IR(D_i) \right)^2 + \left(\frac{2\bar{D}_f}{D_i^2} \cdot IR(D_f) \right)^2} \quad \text{C.10}$$

onde \bar{D}_f é a média das medidas do diâmetro final, $IR(D_i)$ é a incerteza da variável D_i e $IR(D_f)$ é a incerteza da variável D_f . A tabela C.2 mostra os valores médios, de incerteza absoluta e relativa da grandeza ductilidade para as 3 classes de materiais ensaiados.

Tabela C.2 - Resultados finais de ductilidade.

Material	Ductilidade Média [%]	Incerteza Absoluta [%]	Incerteza Relativa [%]
1020	76,3	± 1,2	1,6
1040	52,9	± 0,9	1,7
300M	61,6	± 4,3	7,0

Limite de Resistência à Tração

A tensão limite de resistência à tração é definida pela razão entre a carga máxima ocorrida no ensaio de tração monotônico e a área inicial do corpo de prova. As forças máximas foram medidas na própria máquina de ensaio de tração considerando 4 amostras de corpos de



prova, exceto para o aço 300M, cujo número de amostras foi 3. As incertezas associadas à força máxima foi obtida utilizando-se a Equação C.3.

O diâmetro inicial da seção transversal foi medido uma única vez, como forma de controle dimensional quando os corpos de prova estavam em fase de fabricação. A incerteza dessa variável é assumida ser 0,05mm, que corresponde ao máximo valor de incerteza para o caso de sistema de medição digital. Da mesma forma, utilizou-se um paquímetro digital Mitutoyo Digimatic com faixa de operação de 0,01 a 150mm. A equação para a determinação do limite de resistência à tração é mostrada abaixo.

$$\sigma_t = \frac{4F_{tm\acute{a}x}}{\pi D_i^2} \quad C.11$$

onde $F_{tm\acute{a}x}$ é a máxima carga determinada do gráfico força vs deslocamento em kgf e D_i é o diâmetro inicial em mm. Derivando parcialmente a função $\sigma_t(F_{tm\acute{a}x}, D_i)$ em relação à força máxima e em relação ao diâmetro inicial e, ainda, considerando as respectivas incertezas dessas grandezas, foi possível obter a incerteza final provável do limite de resistência à tração para cada material ensaiado. A Equação C.12 mostra a expressão e a Tabela C.3 reúne os valores já devidamente convertidos de kgf/mm² para MPa.

$$IR(\sigma_t)_{prov} = \sqrt{\left(\frac{4}{\pi D_i^2} \cdot IR(F_{tm\acute{a}x})\right)^2 + \left(\frac{-8\bar{F}_{tm\acute{a}x}}{\pi D_i^3} \cdot IR(D_i)\right)^2} \quad C.12$$

onde $\bar{F}_{tm\acute{a}x}$ é a média das medidas da força máxima em kgf, $IR(F_{tm\acute{a}x})$ é a incerteza da variável $F_{tm\acute{a}x}$ e $IR(D_i)$ é a incerteza da variável D_i .

Tabela C.3 - Resultados finais do limite de resistência à tração.

Material	Limite de Resistência à Tração Médio [MPa]	Incerteza Absoluta [MPa]	Incerteza Relativa [%]
1020	386,5	± 26,5	6,8
1040	598,1	± 13,1	2,2
300M	729,7	± 87,1	11,9

Tenacidade

A tenacidade convencional, utilizada neste trabalho como valor de referência para comparação com a energia calculada pela curva força vs tempo, foi medida juntamente com a força de impacto e as opções de instrumentação. Porém, seu valor é obtido de forma direta pelo mostrador da máquina de ensaio. Assim, a análise das incertezas dessa grandeza restringe-se à Equação C.3, uma vez que a tenacidade não é determinada por expressões de recorrência e a combinação de incertezas deixa de ser necessária. A Tabela C.4 apresenta as médias e as incertezas para cada tipo de material.

Tabela C.4 - Resultados finais de tenacidade.

Material	Tenacidade Média [J]		Incerteza Absoluta [J]		Incerteza Relativa [%]	
	INSTRON	HECKERT	INSTRON	HECKERT	INSTRON	HECKERT
1020	-	227,7	-	± 9,9	-	± 4,3
1040	-	18,1	-	± 1,6	-	± 8,8
300M	30,5	33,5	± 2,5	± 4,0	± 8,2	± 11,9
8640	9,5	13,7	± 1,3	± 2,3	± 13,7	± 15,8
Al 7050	15,0	16,0	± 1,4	± 2,0	± 12,5	± 9,3

Força Máxima Medida no Ensaio de Flexão Monotônico

Os valores das forças máximas determinadas no ensaio de flexão submetido a um carregamento monotônico foram medidos utilizando-se um anel dinamométrico, de capacidade máxima igual a 4000kgf e resolução igual a 2,1kgf. Na realidade, um relógio comparador milesimal posicionado no centro do anel media o deslocamento linear da sua parte inferior devido à força compressiva. A Equação C.13 mostra a relação de recorrência.

$$F_{\text{fmax}} = \frac{d_r}{0,4745} \quad \text{C.13}$$



onde $F_{f_{\max}}$ é força de flexão máxima dada em kgf e d_r é o deslocamento linear em mm. De modo análogo aos cálculos anteriores, a Equação C.3 forneceu as incertezas da grandeza d_r , considerando 3 amostras para cada material. O desenvolvimento da Equação C.5 resultou na incerteza provável da força máxima, isto é,

$$IR(F_{f_{\max}})_{\text{prov}} = \frac{IR(d_r)}{0,4745} \quad \text{C.14}$$

onde $IR(d_r)$ é a incerteza do resultado da variável d_r . A Tabela C.5 apresenta as forças médias, as incertezas absolutas e relativas para os materiais ensaiados.

Tabela C.5 - Resultados finais da força máxima medida no ensaio de flexão monotônico.

Material	Força Máxima Média [kN]	Incerteza Absoluta [kN]	Incerteza Relativa [%]
1020	12,54	± 0,12	1,0
1040	13,04	± 0,08	0,6
300M	17,56	± 1,01	5,8
8640	20,67	± 1,62	7,8
Al 7050	9,47	± 0,05	0,5

Tenacidade à Fratura Aparente

A tenacidade à fratura dinâmica aparente, representada pelo fator de intensidade de tensões aparente na condição de carregamento dinâmico, denotado por $K_{I_{da}}$, foi calculado considerando a formulação empírica apresentada na norma ASTM E399-90 para o caso da flexão, ou seja,

$$K_{I_{da}} = \frac{F_m S}{BW^{3/2}} \left[\frac{3 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} \left[1,99 - \left(\frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right) \left\{ 2,15 - 3,93 \left(\frac{a}{W} \right) + 2,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right\} \right]}{2 \left[1 + 2 \left(\frac{a}{W} \right) \right] \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}} \right] \quad \text{C.15}$$



onde a [m] é a profundidade do entalhe, W [m] é a largura do corpo de prova, S [m] é o vão da base de apoio dos corpos de prova, B [m] é a espessura do corpo de prova e F_m [kN] é a força máxima. As dimensões a , B , W e S foram medidas uma única vez, sendo suas incertezas fixadas em $2 \cdot 10^{-5}$ m. Aplicando a Equação C.5 e lembrando que as variáveis a , B , W e S são estatisticamente dependentes, foi possível determinar a expressão utilizada no cálculo da incerteza final provável do fator de intensidade de tensões dinâmico aparente, que é dada por:

$$IR(K_{I_{da}})_{prov} = \frac{1}{1000} \cdot \sqrt{[4699,5 \cdot IR(F_m)]^2 + (-0,82325 \cdot \bar{F}_m)^2} \quad C.16$$

onde $IR(F_m)$ é a incerteza do resultado das medições da força máxima em kN. As Tabelas C.6 e C.7 mostram o fator de intensidade de tensões dinâmico médio, a incerteza absoluta e relativa para todos os materiais e todas as combinações de ensaio, variando-se o material e a velocidade de impacto na etapa 1 do trabalho e variando-se o material e o sistema de medição na etapa 2. A Tabela C.8 apresenta os mesmos resultados, porém na condição monotônica. A tenacidade à fratura aparente, em condição monotônica, é representada pelo parâmetro K_{Ica} .

Tabela C.6 - Resultados finais de $K_{I_{da}}$ obtidos na etapa 1.

Material	Velocidade de Impacto [m/s]	$K_{I_{da}}$ Médio [MPa.m ^{1/2}]	Incerteza Absoluta [MPa.m ^{1/2}]	Incerteza Relativa [%]
1020	5,48	21,4	0,5	2,3
	5,24	23,8	0,3	1,3
	4,45	35,5	2,9	8,2
1040	5,48	2,1	0,3	14,3
	5,24	2,6	0,2	7,7
	4,45	2,4	0,1	4,2
300M	5,48	2,2	0,2	9,1
	5,24	2,8	0,2	7,1
	4,45	3,3	0,4	12,1



Tabela C.7 - Resultados finais de K_{Ida} obtidos na etapa 2.

Material	Sistema de Medida Adotado	K_{Ida} Médio [MPa.m ^{1/2}]	Incerteza Absoluta [MPa.m ^{1/2}]	Incerteza Relativa [%]
1040	PCB - UNESP	76,6	3,8	5,0
	INSTRON - USP	-	-	-
	SENSORTEC - UNESP	40,4	0,2	0,5
8640	PCB - UNESP	99,2	5,4	5,4
	INSTRON - USP	81,3	8,0	9,8
	SENSORTEC - UNESP	39,9	3,4	8,5
300M	PCB - UNESP	84,1	0,8	1,0
	INSTRON - USP	86,9	1,1	1,3
	SENSORTEC - UNESP	93,0	2,5	2,7
Al 7050	PCB - UNESP	45,6	3,0	6,6
	INSTRON - USP	46,1	0,2	0,4
	SENSORTEC - UNESP	38,5	3,3	8,6

Tabela C.8 - Resultados finais de K_{Ica} obtidos nas etapas 1 e 2.

Material	K_{Ica} Médio [MPa.m ^{1/2}]	Incerteza Absoluta [MPa.m ^{1/2}]	Incerteza Relativa [%]
1020	58,7	0,6	1,0
1040	61,1	0,4	0,6
300M	82,7	4,8	5,8
8640	97,3	7,6	7,8
Al 7050	44,6	0,2	0,4



unesp 

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

**Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dem.feis.unesp.br**

