unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DOADO

1210001601

IMPLEMENTAÇÃO DA NORMA ISO 14.556 PARA INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO CHARPY CONVENCIONAL E COMPARAÇÃO COM NOVA METODOLOGIA PROPOSTA

Eduardo Leira Kruger

Ilha Solteira - SP

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18 19

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

IMPLEMENTAÇÃO DA NORMA ISO 14.556 PARA INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO CHARPY CONVENCIONAL E COMPARAÇÃO COM NOVA METODOLOGIA PROPOSTA

Proc. 055/05-NAD 132
UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO

DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
15.08.05	31.08.05
REGISTRADO POR	TOMBO
Aiza	Te. 1601
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Doação Autor R$ 10,00	K94i

1210001601

Ilha Solteira

Co sys 323776
sys 58891

BCpIS - FEIS - UNESP

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

IMPLEMENTAÇÃO DA NORMA ISO 14.556 PARA INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO CHARPY CONVENCIONAL E COMPARAÇÃO COM NOVA METODOLOGIA PROPOSTA

Eduardo Leira Kruger

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

Ilha Solteira, Outubro de 2003

BCpIS - FEIS - UNESP

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Kruger, Eduardo Leira

K94i Implementação da norma ISO 14.556 para instrumentação do ensaio Charpy convencional e comparação com nova metodologia proposta / Eduardo Leira Kruger, Ilha Solteira : [s.n.], 2003

xxiii, 131 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2003

Orientador: Ruís Camargo Tokimatsu

Bibliografia: p. 96-98

1. Metais – Fratura. 2. Processos de fabricação.

30505003

IMPLEMENTAÇÃO DA NORMA ISO 14.556 PARA INSTRUMENTAÇÃO DO ENSAIO CHARPY CONVENCIONAL E COMPARAÇÃO COM NOVA METODOLOGIA PROPOSTA

Eduardo Leira Kruger

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

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

Prof. Dr. João Batista Aparecido - Vice–coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ruis Gamargo Tokimatsu - Orientador

Prof. Dr. Dirceu Spinelli

Prof. PhD Miguel Ângelo Menezes

Ilha Solteira – SP, outubro de 2003

BCpIS - FEIS - UNESP

Dedicatória

a Deus

ao meu pai Mario Lucio, minha mãe Áurea Maria, minha irmã Luciana e meus avós

BCpIS - FEIS - UNESP

Agradecimentos

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

Ao Prof. Dr. Adyles Arato Júnior pelas incansáveis discussões sobre os sistemas de medição.

Ao Prof. Dr. Dirceu Spinelli, do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC - USP, pelos comentários e esclarecimentos sobre o trabalho.

Ao Prof. Dr. Miguel Ângelo Menezes pelos ensinamentos em análise de tensões e extensiometria.

Ao Prof. Dr. Juno Galego pelos ensinamentos e comentários na escrita estrangeira.

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, pelas contribuições na análise dos sinais medidos.

Ao Sr. Euler Barreto Júnior pelas explicações e acompanhamento no processo de instrumentação das células de carga.

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 pelos ensinamentos sobre a utilização do osciloscópio digital.

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

Ao amigo e companheiro de orientação acadêmica Alessandro Roger Rodrigues pelas inúmeras discussões e contribuições em artigos científicos, relatórios científicos e documentos afins.

A todos os companheiros do curso de pós graduação em Engenharia Mecânica.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

Aos colegas do curso de graduação, Flávio José dos Santos, Geraldo Vidotto Junior, Daniel Scarpino de Castro, Adriano Carneiro da Silva e Marcos Hideo da Silva Mashiba 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 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica 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.

Sumário

Lista de Tabelas xii
Lista de Ilustrações xv
Lista de Símbolos xx
Resumo xxii
Abstract xxiii

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1
1.1 Escopo e Estrutura do Trabalho 1
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 Introdução 5
2.2 Ensaio de Impacto Charpy e Izod 11
2.3 Ensaio Charpy Instrumentado 15
2.4 Especificação e Calibração do Sistema de Medida segundo a ISO 14.556 16
2.5 Transdutores e Sensores 24
2.6 Extensômetro Elétrico e as Medidas Dinâmicas 28
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS 31
3.1 Materiais 31
3.2 Metodologia - Etapa 1 32
3.2.1 Descrição da Instalação Experimental 32
3.2.2 Especificação dos Equipamentos 34
3.2.3 Curva de Resposta do Condicionador de Sinais 35
3.2.4 Instrumentação do Martelo Pendular e Callibração p/ Primeira etapa 36
3.3 Metodologia - Etapa 2 38
3.3.1 Instrumenação dos Martelos Pendulares da Máquina de Ensaio 40
3.3.2 Metodologias Adotadas para Calibração Estática dos Martelos 42
3.4 Metodologia - Etapa 3 45
3.4.1 Descrição da Instalação Experimental 45
3.4.2 Especificação dos Equipamentos 47

3.4.3 Instrumentação da Base de Apoio dos Corpos de Prova 48
3.5 Procedimentos de Ensaio observados por Rodrigues (2001) 50
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES 54
4.1 Descrição dos Resultados - Etapa 1 54
4.2 Descrição dos Resultados - Etapa 2 59
4.2.1 Calibração Dinâmica do Condicionador e Estimativa da Resposta do Martelo 59
4.2.2 Calibração Estática do Martelo GC3M pelo Método Rdrigues com variação na região de contato entre o bloco padrão e o Martelo 62
4.2.3 Calibração Estática do Martelo ISO 64
4.2.3.1 Método Rodrigues de Calibração 64
4.2.3.2 Método Vidotto de Calibração 65
4.2.4 Calibração Estática do Martelo GC3M 66
4.2.4.1 Método Rodrigues de Calibração 66
4.2.4.2 Método Vidotto de Calibração 68
4.2.5 Ensaios Charpy Instrumentado a temperatura ambiente 69
4.2.6 Ensaios Charpy Instrumentado a temperatura de ~77K 77
4.3 Descrição dos Resultados - Etapa 3 80
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES 93
5.1 Recomendações para Trabalhos Futuros 94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 96
ANEXO 1 - MARTELOS E PEÇA ISENTA DE VIBRAÇÀO 99
ANEXO 2 - TABELAS DE CALIBRAÇÃO DOS MARETLOS 102
ANEXO 3 - RESULTADOS COMPLEMENTARES DA SEGUNDA ETAPA 110
ANEXO 4 - RESULTADOS COMPLEMENTARES DA TERCEIRA ETAPA 116
ANEXO 5 - ROTINAS COPUTACIONAIS 125
APÊNDICE A - CARTAS DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES PIEZOELÉTRICOS . 130

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Símbolos e significados conforme a Norma ISO 14.556 19
Tabela 3.1 - Equipamentos utilizados na etapa 1 do trabalho. 35
Tabela 3.2 - Equipamentos utilizados na etapa 2 do trabalho. 39
Tabela 3.3 - Material necessário ao pocesso de colagem dos extensômeros 40
Tabela 3.4 - Equipamentos utiizados na etapa 3 do trabalho. 47
Tabela 4.1 – Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(Wd) e obtidos por integração numérica (Wi), observando apenas o Martelo ISO e o Método Rodrigues de calibração estática.. 59
Tabela 4.2 - Resultados da calibração estática do mMartelo GC3M para o Método Rodrigues com variação da região de contato entre o bloco padrão e o martelo. 63
Tabela 4.3 - Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo ISO para o Método Rodrigues de calibração 64
Tabela 4.4 - Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo ISO para o Método Vidotto de calibração 65
Tabela 4.5 - Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de calibração 66
Tabela 4.6 - Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Vidotto de calibração 68
Tabela 4.7 - Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina (W_d) e obtidos por integração numérica ($W_{i\text{-}}$) observando dois métodos de calibração estática - Método Rodrigues e Método Vidotto - para os dois martelos - Martelo ISO e Martelo GC3M 73
Tabela 4.8 - Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina (W_d) e obtidos por integração numérica (W_i) observando apenas o Martelo ISO e o Método Vidotto de calibração estática 80
Tabela 4.9 - Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(Wd) e obtidos por integração numérica (Wi), observando o Martelo ISO e o Método Vidotto de calibração estática, para material alumínio 90
Tabela 4.10 - Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(Wd) e obtidos por integração numérica (Wi), observando o Martelo ISO e o Método Vidotto de calibração estática, para material aço ensaiado. 90

Tabela 4.11 - Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(Wd) e obtidos por integração numérica (Wi), observando o Martelo ISO e o Método Vidotto de calibração estática para material alumínio. 92

Tabela A.2.1 – Resultados da calibração estática do Martelo ISO para o Método Rodrigues de Calibração. 102

Tabela A.2.2 – Resultados da calibração estática do Martelo ISO para o Método Vidotto de Calibração. 104

Tabela A.2.3 – Resultados da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de Calibração. 106

Tabela A.2.4 – Resultados da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Vidotto de Calibração. 108

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Curvas Carregamento-Deslocamento-Energia absorvida para diferentes temperaturas utilizando laser (transdutor de delocamento) 11

Figura 2.2 - Resultado típico do ensaio Charpy clássico para dois materiais distintos A e B. 12

Figura 2.3 - Corpo de prova Charpy normalizado pela ASTM E-23. 13

Figura 2.4 - Efeito da temperatura na tenacidade. 14

Figura 2.5 - Resposta força-tempo para um aço de média resistência mecânica. 16

Figura 2.6 - Valores característicos de força do ensaio Charpy Instrumentado. 19

Figura 2.7 - Erro Permissível de Valores Registrados dentro de uma Faixa de Força Nominal... 22

Figura 2.8 - Curvas características força-deslocamento classificadas pela norma ISO.. 24

Figura 2.9 - Deformação de um cristal piezoelétrico devido à pressão aplicada.. 27

Figura 2.10 - Transmissão de tensão dinâmica entre o corpo-de-prova e o extensômetro. 29

Figura 2.11 - Resposta Dinâmica de um extensômetro para excitação por pulso. 30

Figura 3.1 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 1 do trabalho. 33

Figura 3.2 - Montagem experimental empregada na etapa 1 do trabalho.. 33

Figura 3.3 - Martelo GC3M e Peça Isenta de Vibrações(PIV). 37

Figura 3.4 - Martelo GC3M e Peça Isenta de Vibrações devidamente instrumentados. 38

Figura 3.5 - Martelo ISO. 39

Figura 3.6 - Martelo ISO e Martelo GC3M e as respectivas peças isentas. 43

Figura 3.7 - Dispositivos de fixação dos martelos na prensa para método Rodrigues de calibração 43

Figura 3.8 - Montagem Experimental para calibração no Método Rodrigues. 44

Figura 3.9 - Montagem Experimental para calibração no Método Vidotto. 44

Figura 3.10 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 3 do trabalho. 46

Figura 3.11 - Montagem experimental empregada na etapa 3 do trabalho. 47

Figura 3.12 - Sensores Piezoelétricos e Condicionadores de Sinais. 48

Figura 3.13 - Base de apoio munida de um sensor. 49

Figura 3.14 - Sensores Piezoelétricos locados na base da máquina de ensaio Charpy.. 49

Figura 4.1 - Curva do ensaio de calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de Calibração na etapa 1 55

Figura 4.2 - Sistema de medição completo acoplado à máquina - (a) Detalhe do martelo e peça isenta; (b) Detalhe do Osciloscópio e Condicionador; - (c) Detalhe do Microcomputador. 55

Figura 4.3 - Curvas do Aço ensaiado a temperatura ambiente com W_d=19J 56
Figura 4.4 - Curvas do Aço ensaiado a temperatura ambiente com W_d=18J 56
Figura 4.5 - Curvas do Aço ensaiado a temperatura ambiente com W_d=40J 57
Figura 4.6 - Curvas do Aço ensaiado a temperatura ambiente com W_d=33J 57
Figura 4.7 - Curvas do Aço ensaiado a temperatura ambiente com W_d=12J 58
Figura 4.8 - Curvas do Aço ensaiado a temperatura ambiente com W_d=120J 58
Figura 4.9 - (a) Curva Ganho vs Freqüência (kHz) para ganho de 200
(b) Curva Ganho vs Freqüência (kHz) para ganho de 100 61
Figura 4.10 - Representação esquemática do critério utilizado para definir as posições 1, 2 e 3 no estudo realizado para averiguar a influência da região de contato do bloco padrão e do martelo na calibração estática. 62
Figura 4.11 - Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo ISO para o Método Rodrigues de Calibração 64
Figura 4.12 Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo ISO para o Método Vidotto de Calibração 66
Figura 4.13 - Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de Calibração. 67
Figura 4.14 - Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo GC3M para o Método Vidotto de Calibração 68
Figura 4.15 - Sinal de força vs tempo capturado em uma base de tempo do osciloscópio de 2,5ms. 70
Figura 4.16 - Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Rodrigues de Calibração. 71
Figura 4.17 - Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Vidotto de Calibração. 72
Figura 4.18 - Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Rodrigues de Calibração. .. 72
Figura 4.19 - Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Vidotto de Calibração. 73
Figura 4.20 - Curvas obtidas com ambos os martelos adotando os dois métodos de Calibração. 74
Figura 4.21 - Curvas obtidas com ambos os martelos com fator de calibração do Método Rodrigues 75
Figura 4.22 - Curvas obtidas com ambos os martelos com fator de calibração do Método Vidotto 77
Figura 4.23 - (a) – Análise das oscilações; (b) - Amplitude de ruído nos sinais dos martelos 76
Figura 4.24 - Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com Wd=4,5J 78
Figura 4.25 - Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com Wd=5,0J 78
Figura 4.26 - Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com Wd=5,0J 79
Figura 4.27 - Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com Wd=6,0J 79

Figura 4.28 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=21J.....81

Figura 4.29 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para a mesma réplica da figura anterior.. 82

Figura 4.30 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=20J.....82

Figura 4.31 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para a mesma réplica da figura anterior 83

Figura 4.32 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com Wd=21J. 84

Figura 4.33 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 4442 (verde) para réplica em alumínio com Wd=20J. 84

Figura 4.34 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo sensor 3663 (verde) e pelo sensor 4442 (azul) para réplica em alumínio com Wd=20J. 85

Figura 4.35 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio Wd=20J.....86

Figura 4.36 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio Wd=20J.....86

Figura 4.37 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço com Wd=24,5J.. 87

Figura 4.38 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 para uma réplica em aço com Wd=24,5J.....88

Figura 4.39 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço com Wd=29,5J.. 88

Figura 4.40 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 para uma réplica em aço com Wd=29,5J.....89

Figura 4.41 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 para uma réplica em aço com Wd=26,5J.....89

Figura 4.42 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 para uma réplica em aço com Wd=26,5J.....90

Figura A.1.1 - Desenho esquemático da Peça Isenta de Vibrações (PIV).. 99

Figura A.1.2 - Peça Isenta de Vibrações (PIV).. 99

Figura A.1.3 - Desenho do Martelo ISO 100

Figura A.1.3 - Desenho do Martelo GC3M 101

Figura A.3.1 - Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Rodrigues de Calibração para uma réplica de Wd=29J... 110

Figura A.3.2 - Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Rodrigues de Calibração para uma réplica de Wd=29J.. 111

Figura A.3.3 - Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de Wd=29J 111

Figura A.3.4 - Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de Wd=29J 112

Figura A.3.5 - Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Rodrigues de Calibração para uma réplica de Wd=31J 113

Figura A.3.6 - Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Rodrigues de Calibração. para uma réplica de Wd=32J 113

Figura A.3.7 - Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de Wd=31J 114

Figura A.3.8 - Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de Wd=32J.. 115

Figura A.4.1 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=20,5J. 116

Figura A.4.2 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=20,5J. 116

Figura A.4.3 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com Wd=20,5J. 117

Figura A.4.4 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=19J. 117

Figura A.4.5 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=19J. 119

Figura A.4.6 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com Wd=19J. 118

Figura A.4.7 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=18J. 119

Figura A.4.8 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=18J. 119

Figura A.4.9 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com Wd=18J. 120

Figura A.4.10 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=19,5J. 120

Figura A.4.11 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=19,5J. 121

Figura A.4.12 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo sensor 4442 (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com Wd=19,5J. 121

Figura A.4.13 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo sensor 4442 (Canal 02) e pelo sensor 3663 (Canal 01) para réplica em alumínio com Wd=18J 122

Figura A.4.14 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com Wd=19J. 122

Figura A.4.15 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço ABNT 1040 com Wd=25J 123

Figura A.4.16 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 para uma réplica em aço com Wd=25J 123

Figura A.4.17 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço ABNT 1040 com Wd=25,5J 124

Figura A.4.18 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 para uma réplica em aço com Wd=25,5J 124

Lista de Símbolos

Símbolo	*Significado*	*Unidade*
F	Força	**N**
F_a	Força para parar a trinca	**N**
F_{gy}	Força de escoamento plástico	**N**
F_{iu}	Força de inicialização da trinca	**N**
F_m	Força máxima	**N**
g_n	Aceleração da gravidade	**m/s^2**
H	Altura da queda do centro do golpe do pêndulo	**m**
KV	Energia absorvida como definida pela ISO 148-1	**J**
M	Massa efetiva do pêndulo	**Kg**
S	Deslocamento	**m**
s_a	Deslocamento do final da trinca	**m**
s_{gy}	Deslocamento para escoamento generalizado	**m**
s_{iu}	Deslocamento de inicialização da trinca	**m**
s_m	Deslocamento para máxima força	**m**
s_t	Deslocamento total	**m**
T	Tempo total	**s**
t_o	Tempo para o início da deformação do cdp	**s**
t_r	Tempo de subida do sinal	**s**
v_o	Velocidade inicial do martelo de impacto	**m/s**
v_t	Velocidade do martelo de impacto num tempo t	**m/s**
W_a	Energia para deter a trinca	**J**
W_{iu}	Energia de inicialização da trinca	**J**
W_m	Energia para máxima força	**J**
W_t	Energia total do impacto	**J**
W_d	Energia lida no dial da máquina	**J**

W_i	Energia calculada pela integração da curva força-delocamento estimado	**J**
W_{iR}	Energia calculada pela integração da curva força-delocamento estimado adotando o fator de calibração obtido pelo método Rodrigues de calibração	**J**
W_{iV}	Energia calculada pela integração da curva força-delocamento estimado adotando o fator de calibração obtido pelo método Vidottto de calibração	**J**
mV	Milivoltagem	**mV**

Resumo

KRUGER, E. L. **Implementação da Norma ISO 14.556 para Instrumentação do Ensaio Charpy Convencional e Comparação com Nova Metodologia Proposta**. Ilha Solteira, 2003. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

O presente trabalho propõe a implementação da norma ISO 14.556 para instrumentação de uma máquina de ensaio Charpy convencional. Além disso, uma nova metodologia foi proposta para medida de força durante o impacto. Lançada na comunidade científica em 2001, a norma representa a consolidação das inúmeras experiências e tentativas de instrumentação do ensaio, promovidas desde a década de 60. Dessa forma, para o processo de instrumentação do pêndulo Charpy recorreu-se à seguinte arquitetura de instrumentação: célula de carga (sensores resistivo e piezoelétrico), sistema de condicionamento e aquisição de sinais e um microcomputador, para tratamento do sinal. Para o sensor resistivo, o martelo do pêndulo Charpy foi transformado em uma célula de carga utilizando-se extensômetros elétricos de resistência. A nova metodologia proposta consistiu no uso de sensores piezoelétricos, os quais foram posicionados na base da máquina em contato com o corpo-de-prova. O propósito foi capturar, como resposta do ensaio, curvas do tipo força em função do tempo para ambas as arquiteturas de medição, uma vez que a norma ISO abre alguns precedentes para variações dos seus procedimentos. O processo de calibração estática dos transdutores resistivos foi um dos parâmetros avaliados neste estudo e, cuja influência mostrou ser menor quando este procedimento foi realizado em condições semelhantes ao ensaio de impacto. Assim como o processo de calibração, a configuração dos martelos foi investigada e verificou-se que quanto menor a rigidez do transdutor, maior foi sua sensibilidade, porém os efeitos das ondas de choque no martelo foram amplificados. A proposta inovadora com o uso dos sensores piezoelétricos apresentou resultados bastante satisfatórios, podendo ainda ser otimizada por alterações no posicionamento dos sensores localizados na base da máquina de ensaio.

Palavras-chave: Ensaio Charpy instrumentado, Norma ISO 14.556, sensores piezoelétricos.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

Abstract

KRUGER, E. L. **Implementation of the Norm ISO 14.556 for Instrumentation of the conventional Charpy test and comparison with new Methodology**. Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, 2003. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

The present work proposes the implementation of the standard ISO 14.556 for the instrumentation of a conventional Charpy machine. Also, a new methodology was proposed for measure the force during the impact. Thrown in the scientific community in 2001, the standard represents the consolidation of the countless experiences and attempts of instrumentation of the test, promoted since 1960. In this way, for the test instrumentation was fallen back upon the following architecture instrumentation: load cell (resistive and piezoelectric sensors), conditioning system and acquisition of signs and a microcomputer, for treatment of the signal. For the resistive sensor, the hammer of the pendulum Charpy was transformed in a load cell being used strain gages. The new methodology proposal consisted the use of piezoelectric sensors, which were positioned in the base of the machine in contact with specimens. The purpose was capture, as answer of the instrumented test, curves of the force in function of the time type for both mensuration architectures, once the norm ISO opens some precedents for variations of its procedures. The static calibration process of the resistives transducers was one of the parameters evaluated in this study and, whose influence showed to be smaller when this procedure was accomplished in conditions similar to the impact test. As well as the calibration process, the configuration of the hammers was investigated and it was verified that as smaller the rigidity of the transducer, adult was its sensibility, even so the effects of the shock waves in the hammer they were amplified. The innovative proposal with the use of the piezoelectric sensors presented quite satisfactory results, could still be otimized for alterations in the positioning of the sensor ones located in the base of the test machine.

Key-words: Instrumented Charpy test, norm ISO 14.556, piezoelectric sensors

Introdução

1.1 Escopo e Estrutura do Trabalho

O ensaio Charpy Instrumentado, estudado desde a década de 60, representa uma ferramenta de grande potencial por fornecer uma gama de informações adicionais, destinadas à caracterização mecânica de materiais, quando comparado ao ensaio Charpy convencional. Pode, cada vez mais abrangentemente, participar do desenvolvimento e qualificação pormenorizada de novos materiais lançados continuamente no mercado.

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 implementar a instrumentação do ensaio Charpy convencional, respeitando-se os recentes procedimentos estabelecidos pela norma ISO 14.556, recorrendo-se à aplicação de transdutores piezoelétricos específicos para carregamentos de impacto e comparar os resultados das duas formas de instrumentação. 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.

As justificativas mais específicas que sustentam a execução deste projeto de pesquisa proposto partem, em uma primeira instância, da própria norma ISO 14.556. Devido à recente publicação da norma no meio científico e a contemporaneidade da divulgação diante da

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

comunidade científica interessada neste assunto, estima-se que poucos pesquisadores, especialmente no Brasil, tenham conhecimento deste documento e tiveram a oportunidade de aplicar e avaliar os procedimentos indicados pela norma.

A norma, segundo as especificações e recomendações constantes, é flexível, permitindo que outras implementações instrumentais possam ser empreendidas. Para tanto, alguns requisitos mínimos relacionados ao sistema de aquisição de sinais devem ser atendidos, para que certas flexibilizações da norma possam ser adequadamente aplicadas. Um exemplo típico apresentado, trata-se da resposta em freqüência do condicionador/amplificador de sinais da cadeia de medição.

A maioria dos trabalhos científicos nesta área utilizam transdutores resistivos, desenvolvidos a partir de técnicas extensométricas. Nota-se que existem poucas contribuições na utilização de outras técnicas de instrumentação do ensaio. A metodologia de aplicação de transdutores piezoelétricos para medida de forças provenientes de impacto, conforme apresentado por Rodrigues(2001), conduziu-se à uma técnica boa e inexplorada, além da excelente resposta dinâmica e linearidade dos sensores, especialmente para o caso de uma aplicação no ensaio Charpy. Esta metodologia de Rodrigues(2001) foi implementada neste trabalho, com o objetivo de se verificar primeiramente se as características da cadeia de medição piezoelétrico satisfazia as especificações e recomendações da norma e, posteriormente foi comparado os resultados com a cadeia de medição extensométrica.

Num contexto genérico, há no Brasil um número reduzido de máquinas Charpy instrumentadas e de propostas para estudo destes equipamentos. Segundo um levantamento realizado pelo Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural de Materiais (GC3M) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), a Universidade Federal de Minas Gerais, através de um trabalho realizado por Quinan (1996), a Universidade de São Paulo (EESC-USP) e a Universidade Estadual Paulista (FEIS-UNESP) possuem máquinas instrumentadas. O estudo da instrumentação do ensaio realizado na FEIS-UNESP seguem uma seqüência cronológica, iniciaram-se em 1994 por Delforge como dissertação de mestrado. Em 2001 outra dissertação de mestrado foi alcançada por Rodrigues, além de trabalhos de iniciação científica. Parte da revisão bibliográfica encontrada neste documento foi extraída de Rodrigues(2001).

O aprimoramento da máquina de ensaio Charpy anteriormente instrumentada por conta de dois trabalhos de mestrado, consolida os motivos pelos quais procurou-se continuar a estudar o processo de instrumentação. 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, reforçaram a motivação para a realização deste trabalho de pesquisa.

Esta dissertação de mestrado está dividida e organizada em 5 capítulos, 5 anexos e 1 apêndice, 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 o escopo e estrutura do documento, revelando um breve comentário acerca da normatização ISO 14.556, as justificativas e os objetivos que sustentaram a execução deste trabalho.

No Capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica fundamental ao trabalho experimental. Considera-se extremamente relevante retratar que a base dessa revisão refere-se àquela apresentada por Rodrigues (2001). O conteúdo, praticamente em sua totalidade, foi aproveitado visando agregar resultados da literatura mais recentes e adequar ao contexto deste documento. Esse procedimento foi assim escolhido por considerar esse trabalho parte integrante de um conjunto de informações e resultados já consolidados pertencentes ao GC3M, no qual essa pesquisa também se insere.

Portanto, as diferenças residem apenas na exclusão dos itens: Ensaios Mecânicos e dos subitens Condições para Instrumentação do Ensaio Charpy, Especificação e Instrumentação do Sistema de Medida segundo a ASM, Tipos de Sinais, Comportamento dos Sistemas de Medida e Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica. Outro item, no entanto, foi acrescentado por ser necessário à revisão: Extensômetro Elétrico e as Medidas Dinâmicas.

O Capítulo 3 descreve os materiais e a metodologia empregues no trabalho. Diversos materiais foram ensaiados com a finalidade de se encontrar várias resistências ao impacto promovendo assim uma maneira de avaliar se a cadeia de medição estava respondendo para condições de tenacidade adversas. A metodologia experimental está subdividida em três etapas. A primeira utiliza, um condicionador de sinais desenvolvido pelo Laboratório de Qualidade e Conservação de Energia Elétrica/FEIS/UNESP com resposta em freqüência de 135kHz e um martelo pendular transformado em transdutor de força com base em extensômetros elétricos de resistência. Nesta fase, o objetivo era conhecer a resposta do condicionador de sinais para materiais de baixa tenacidade, pois o evento(impacto) é relativamente rápido se comparado com materiais de alta tenacidade. A forma de avaliar a resposta do aparelho é mediante a integração da curva força-deslocamento estimado e comparar com o valor de energia de impacto (tenacidade) lida diretamente no dial da máquina.

A segunda etapa refere-se à utilização de uma nova resposta em freqüência do condicionador de sinais, agora acima de 200kHz com ganho de 100 vezes do aparelho, e à utilização de dois martelos distintos instrumentados conforme a normatização. Nesta etapa, o principal objetivo foi avaliar novamente o condicionador de sinais e a geometria do martelo nos sinais de força-tempo.

Finalizando, a terceira etapa, refere-se ao uso 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 e discussões das três etapas do processo de instrumentação. As curvas de calibração das células de carga força-tensão, as curvas de resposta dos condicionadores de sinais tensão-freqüência e o conjunto de curvas medidas para os diversos materiais ensaiados, tais como força-tempo e força-deslocamento estimado, são mostrados. De uma maneira compacta e quantitativa, os valores de energia são expostos em forma de tabelas e gráficos.

O Capítulo 5 descreve as conclusões sobre os resultados alcançados. Algumas variáveis foram estudadas de modo a avaliar e qualificar as instrumentações efetuadas. 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 como item no documento. O Anexo 1 contém os desenhos dos martelos e a peça isenta de vibração, no Anexo 2 encontram-se as tabelas de calibração dos martelos para os dois métodos de calibração, no Anexo 3 encontra-se o complemento dos ensaios da segunda etapa, no Anexo 4 mostra parte dos resultados da terceira etapa e finalmente no Anexo 5 as rotinas computacionais desenvolvidas. O apêndice A traz as cartas de calibração dos sensores piezoelétricos.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

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 - 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.

Böhme e Kalthoff (1982), 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 dados de força-tempo

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

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 de reatores nucleares, onde a microestrutura e as propriedades mecânicas dos componentes são alteradas com a variação da temperatura e irradiação oriunda do processo térmico envolvido. Um monitoramento contínuo destas 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 e Kobayashi (1993), desenvolveram um sistema de avaliação da tenacidade à fratura dinâmica auxiliada por computador, associando-o à máquina de ensaio Charpy convencional. Por meio deste sistema, denominado de *Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing - CAI* - é possível determinar a tenacidade à fratura dinâmica, dada pelos parâmetros K_{Id} e J_{Id}, além das energias obtidas com base nas curvas força - 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). Neste estudo, avaliou-se a propriedade utilizando corpos de prova com geometria de entalhe lateral e validou-se 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 e Takahashi (1996), 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 lâminas de borracha de diferentes espessuras e comparou-se os sinais medidos para todos os casos considerados.

Perosanz et al. (1998), 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

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

apresentada. Ela baseia-se nas integrações da curva força - tempo considerando a massa do martelo e a lei do movimento de Newton.

Böhme et al. (1999), avaliou e comparou a dispersão dos resultados das medidas 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). Uma máquina de ensaio Charpy instrumentada é utilizada 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 - CEPEL - 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 em função do 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.

Rodrigues (2001), por intermédio de um trabalho de mestrado, analisou o teste de impacto Charpy Instrumentado recorrendo-se a sensores piezoelétricos, como transdutores de força, alojados na base de apoio dos corpos de prova. Comparou os resultados obtidos com aqueles conseguidos pelo uso de extensômetros elétricos, fixados no cutelo do martelo pendular, tal como proposto por Delforge (1994). Assim, a máquina de ensaio Charpy Convencional adquiriu uma nova forma e tornou-se duplamente instrumentada. Foi estudada a tenacidade à fratura dinâmica aparente de materiais metálicos e os resultados obtidos mostraram que os sensores piezoelétricos dinâmicos funcionam como confiáveis transdutores de força para o ensaio em questão.

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.

Estudos recentes têm trazido valiosas contribuições, como exemplo a Conferência Charpy no ano de 2001 realizada na França comemorando os cem anos de ensaio Charpy. Dentro deste contexto foram publicados aproximadamente cento e sessenta trabalhos dos quais apenas dez por cento se preocuparam com a instrumentação, interpretação, modelagem do ensaio Charpy instrumentado. Toshiro Kobayashi, em parceria com Toda, H. e Masuda T. analisaram os sinais obtidos do ensaio de impacto convencional e do ensaio de tensão de impacto. Utilizaram

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

uma máquina de ensaio Charpy convencional com capacidade de 490J com velocidade de impacto de 5m/s e uma máquina servo-hidraúlica com capacidade de 45kN e velocidade de carregamento de 0,01 a 12m/s.

Manahan M. P. e Stonesifer no CCC 2001 (Charpy Centenary Conference 2001) estudaram a otimização de designes de martelos (cutelos). Revelaram que o carregamento indicado pelo martelo do ensaio Charpy Instrumentado pode ser adversamente afetado por forças inércias no martelo e por variações no contato da distribuição de força entre o martelo e corpo-de-prova.

Manahan et al. (2001) relata a aplicação de encoders ópticos na medida da energia de impacto Charpy tem aumentado significativamente a precisão da determinação da "energia do dial". Martelos instrumentados constituem um método alternativo de medida de energia, que é acurado e reproduzível para ensaios tanto com corpo-de-prova convencional como em miniatura, enquanto fornecem informações úteis, tais como carregamento geral produzido, carga máxima, carga de fratura frágil, e carga obtida para fratura frágil. Tem-se observado que a energia total absorvida medida usando estas duas tecnologias geralmente apresenta-se em acordo, mas as vezes difere por uma quantidade significante. A energia total absorvida do martelo instrumentado tem sido maior ou menor do que a energia medida pelo encoder óptico dependendo da ductilidade dos corpos-de-prova entre outros fatores.

Morita et al. (2001) apresenta problemas relacionados com a medida do sinal de carregamento no ensaio Charpy Instrumentado. Constatou que ao diminuir a espessura do corpo-de-prova resulta em uma ligeira diminuição dos fatores de calibração. Isto foi atribuído para localização da deformação próxima da região a qual os strain gages foram colados. Os resultados sugeriram fortemente que o sistema deve ser calibrado para diferentes espessuras dos corpos-de-prova para conhecer a acuracidade do carregamento de impacto.

Tanguy et al. (2001) da *Ecole des Mines de Paris*, propôs uma simulação numérica do ensaio *Charpy-V* no regime dútil-frágil de transição. Para a simulação foram utilizadas três condições; (i) a temperatura viscoplástica depende do comportamento do material não alterado, (ii) iniciação da trinca e o crescimento são causados pro falha dútil e (iii) fratura frágil. O modelo da falha dútil foi baseado no modelo modificado de Rousselier. A fratura por clivagem foi decrita usando o modelo de Beremin.

Tronskar et al. (2001) apresentou um estudo que apontava o desenvolvimento de um método para a medida direta da curva força-deslocamento durante o ensaio de impacto Charpy. O método envolve a medida direta do deslocamento usando um interferômetro a laser em adição

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

com a curva força-deslocamento, derivada do sinal de força por dupla integração de acordo com os procedimentos normalizados. A extremidade do cutelo ISO foi instrumentada com um sensor piezoelétrico e o sistema é calibrado na própria máquina de impacto como recomendado pela norma ISO 14556 (2000), usando uma célula de carga de acuracidade 0,5% e um sistema de prensa hidráulica. A figura a seguir apresenta os resultados de Tronskar.

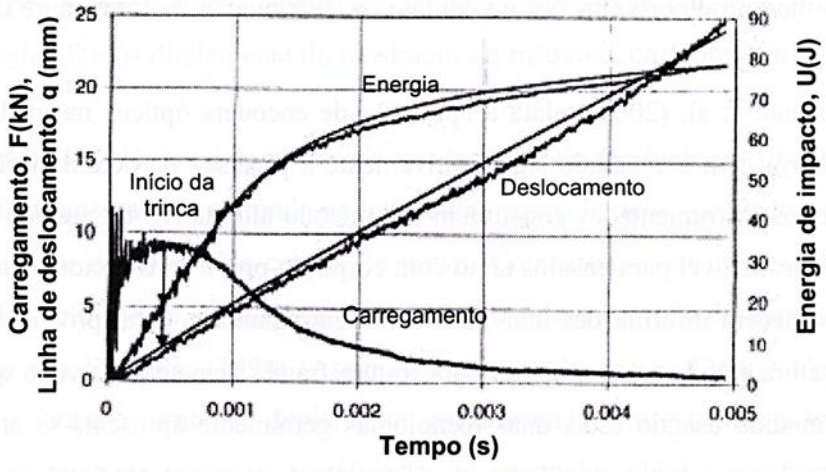


Figura 2.1(a) – Carregamento, deslocamento e energias contra o tempo para um CDP pré-trincado ensaiado a +23° C. A energia de impacto mostrada no dial foi de 76 J.

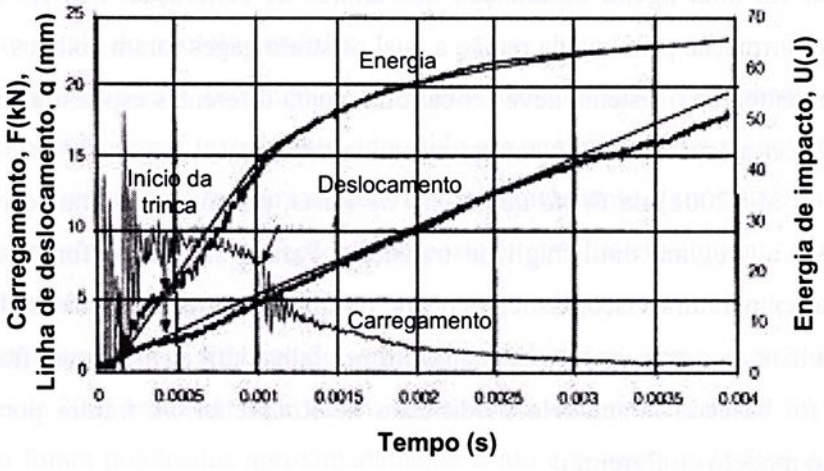


Figura 2.1(b) – Carregamento, deslocamento e energias contra o tempo para um CDP pré-trincado ensaiado a 0° C. A energia de impacto mostrada no dial foi de 68 J.

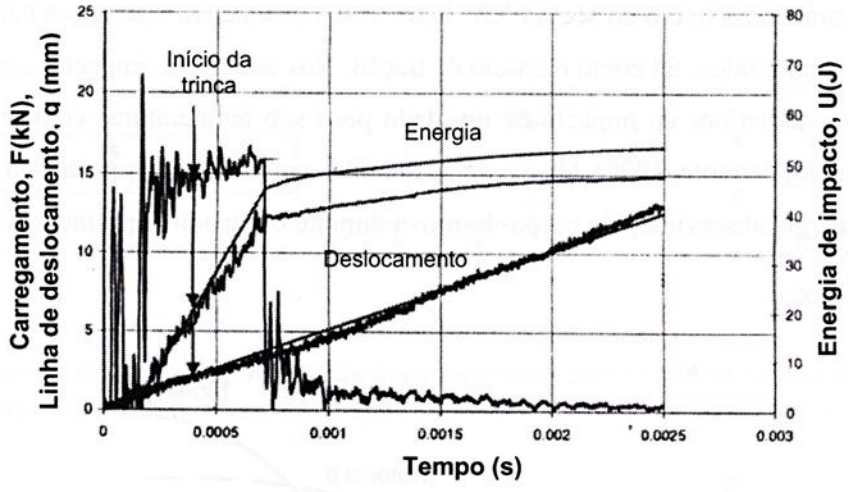


Figura 2.1(c) – Carregamento, deslocamento e energias plotadas contra o tempo para um CDP Charpy com entalhe em V ensaiado à temperatura de –40ºC. A energia de impacto mostrada era de 57J.
Figura 2.1 – Curvas Carregamento - Deslocamento - Energia absorvida para diferentes temperaturas utilizando laser (transdutor de delocamento) Fonte: Tronskar, 2001

Recentemente, a norma ISO 14.556 consolida os procedimentos necessários para instrumentação de uma máquina de ensaio convencional. Lançada em 2000, este documento propõe metodologias para montagem e calibração do transdutor de força (martelo instrumentado), especifica em termos de resposta em freqüência a cadeia de medida do ensaio e classifica o material ensaiado a partir do sinal obtido. Dentro destes procedimentos e recomendações destacam alguns, como, a avaliação dinâmica de todo o sistema e calibração estática do martelo.

2.2 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 do ensaio. As 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).

unesp

Os ensaios Charpy e Izod são aprimoramentos de ensaios que foram desenvolvidos e colocados em prática no início do século XX. Estes ensaios 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 obtidos no ensaio de impacto são apresentados na forma de energia absorvida pelo corpo-de-prova durante o impacto em função da temperatura (Broek, 1995).

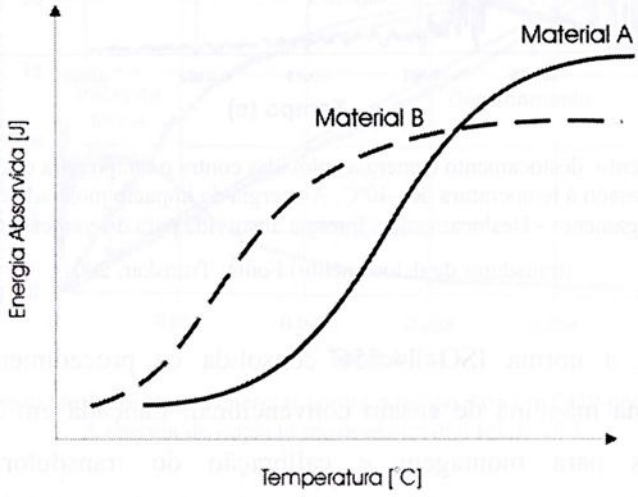


Figura 2.2 - Resultado típico do ensaio Charpy clássico para dois materiais distintos A e B.
(Fonte: Dieter, 1988)

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 norma ASTM E-23.

O corpo-de-prova Charpy possui comprimento de 55mm, uma seção quadrada de lado de 10mm e apresenta um entalhe em V, com ângulo de abertura igual a 45° e comprimento 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 as mesmas características do entalhe Charpy. No ensaio Izod, os corpos

unesp

de prova são engastados na base da máquina. A Figura 2.3 mostra o desenho e as dimensões do corpo-de-prova Charpy-V.

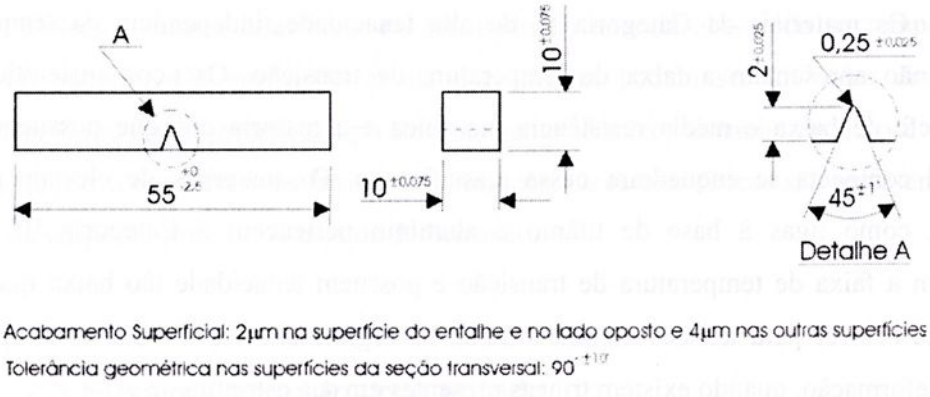


Figura 2.3 - Corpo-de-prova Charpy normalizado pela norma ASTM E-23.
(Fonte: American Society for Testing and Materials, 1996)

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, reprodutível 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. Esta dispersão se deve também às variações locais nas propriedades dos materiais - enquanto outras ocorrem devido às dificuldades em se preparar entalhes perfeitamente reprodutíveis. Tanto a forma, a profundidade do entalhe, quanto o posicionamento adequado do corpo-de-prova na máquina de impacto são variáveis críticas.

Como invariavelmente ocorre, o ensaio em pauta apresenta algumas limitações. A principal medida é a da energia absorvida para fraturar um 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.

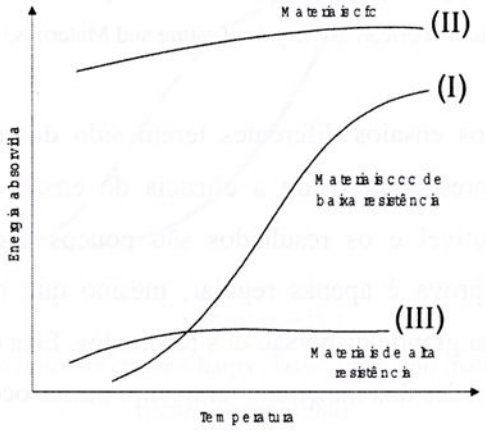


Figura 2.4 - Efeito da temperatura na tenacidade.
(Fonte: Dieter, 1988)

A principal aplicação do ensaio Charpy fundamenta-se na seleção de materiais resistentes à fratura frágil. A filosofia do projeto baseada neste ensaio, restringe-se em selecionar um material que possua suficiente energia para fratura 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 concentrações de tensão provocadas pelas trincas.

Assim, a estratégia de projeto para controle da fratura, segundo esta filosofia, visa simplesmente a operação do componente no patamar superior da curva energia-temperatura, isto é, acima da temperatura de transição. O objetivo é evitar a fratura frágil. No entanto, este

procedimento não impede a ocorrência deste modo de fratura, pois a tenacidade dos materiais é finita mesmo no patamar superior da curva de transição.

Diversos fatores interferem no resultado da energia absorvida na temperatura de transição do material. De um modo geral, estes fatores podem ser divididos em físicos e metalúrgicos. Composição química, tipo de tratamento térmico, tamanho de grão e orientação dos corpos de prova constituem os fatores metalúrgicos. Os fatores físicos são representados pela geometria do corpo-de-prova e da taxa de deformação.

2.3 Ensaio Charpy Instrumentado

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

A Figura 2.5 ilustra esquematicamente o comportamento das curvas força-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-tempo até o carregamento máximo P_M. Este valor de pulso é convertido em energia, aplicando-se a lei do movimento de Newton, que considera a velocidade do pêndulo decrescente durante o processo de deformação e fratura. Esta velocidade decrescente é proporcional à força instantânea aplicada no corpo-de-prova em qualquer tempo particular t_i (Hertzberg, 1995). A energia absorvida é portanto,

$$\Delta E = E_a\left[1-\left(\frac{E_a}{4E_0}\right)\right] \tag{2.1}$$

onde E_0 é a energia cinética total do pêndulo $\left(\frac{1}{2}mV_0^2\right)$ e

$$E_a = V_0 \int_0^{t_i} P dt \qquad (2.2)$$

onde V_0 é a velocidade inicial de impacto e m é a massa do martelo pendular e E_a é a energia para causar a fratura do corpo-de-prova. 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.

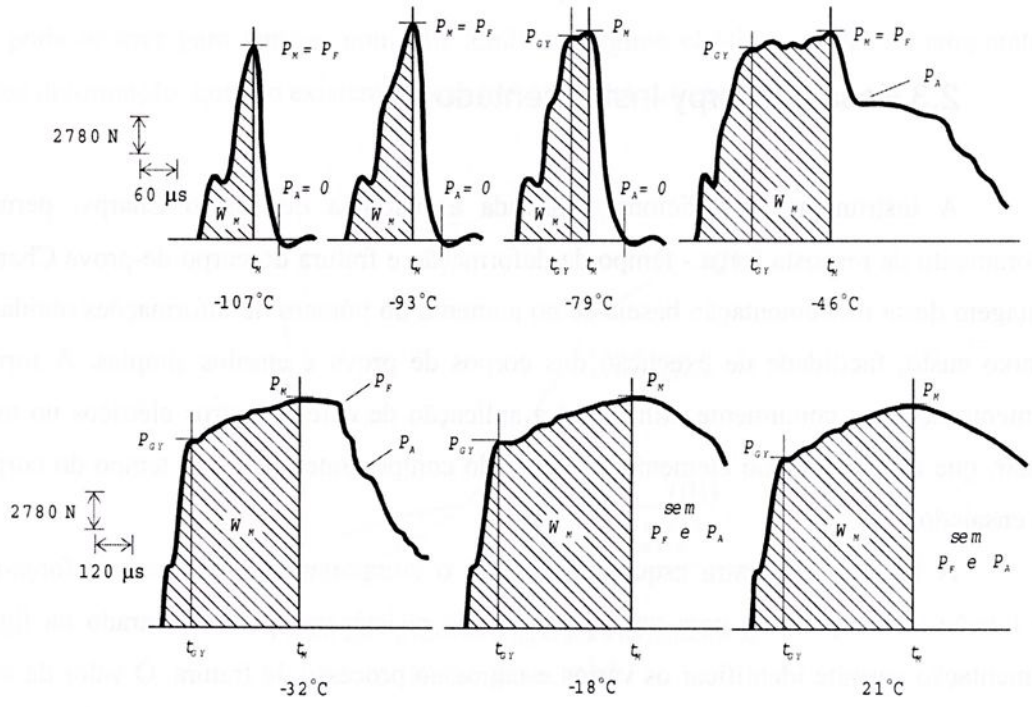


Figura 2.5 - Resposta força - tempo para um aço de média resistência mecânica.
(Fonte: Shockey, 1995)

2.4 Especificação e Calibração do Sistema de Medida segundo a norma ISO 14.556(2000)

Esta Padronização Internacional especifica um método de instrumentação do ensaio de impacto Charpy em um corpo-de-prova de aço com entalhe - V e as exigências a respeito das medidas e sistema de aquisição e tratamento de dados.

Esta norma pode ser aplicada para outros materiais metálicos fornecendo informações sobre o comportamento em fratura dos produtos ensaiados. Vale ressaltar que mais duas Normas

estão vinculadas a esta: ISO 148.1 – Charpy Pendulum impact Test – Part 1: Test Method e ISO 148.2 – Charpy Pendulum impact Test – Part 2: Verification of Test machines.

Com a finalidade de padronização internacional, os seguintes termos e definições forma adotados.

Valores característicos da força

Nota: Valores característicos da força são expressos em Newtons.

- *Força no escoamento (F_{gy})*

Força no ponto de transição da parte linear para a parte curva do gráfico força-deslocamento.

- *Força Máxima (F_m)*

Máxima força no percurso da curva força-deslocamento.

- *Força de iniciação da trinca (F_{iu})*

Força para o início da queda abrupta na curva força-deslocamento.

Nota: Isto caracteriza o início da instabilidade de propagação da trinca.

- *Força para parar a trinca (F_a)*

Força no final da instabilidade de propagação da trinca.

Valores característicos do deslocamento

Nota: Valores característicos do deslocamento são medidos em metros.

- *Deslocamento no escoamento generalizado (S_{gy})*

Deslocamento correspondente à força no escoamento plástico, F_{gy}.

- *Deslocamento na força máxima (S_m)*

Deslocamento correspondente à força máxima.

- *Deslocamento na iniciação da trinca (S_{iu})*

Deslocamento para a inicialização da instabilidade de propagação da trinca.

- *Deslocamento no ponto de parada da trinca (S_a)*

Deslocamento para deter instabilidade para propagação da trinca.

- *Deslocamento Total (S_t)*

Deslocamento no fim da curva força-deslocamento.

Valores característicos da energia de impacto

Nota: Valores característicos da energia de impacto são expressos em Joules.

- *Energia na força máxima (W_m)*

Energia parcial de impacto S=0 até $S=S_m$.

- *Energia para iniciação da trinca (W_{iu})*

Energia parcial de impacto de S=0 até $S=S_{iu}$.

- *Energia no ponto de parada da trinca (W_a)*

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

Energia parcial de impacto de S=0 até S=S_a.

- *Energia total de impacto (W_t)*

Energia absorvida no processo de fratura do corpo-de-prova, calculada pela da área sob a curva força-deslocamento de S=0 até S=S_t.

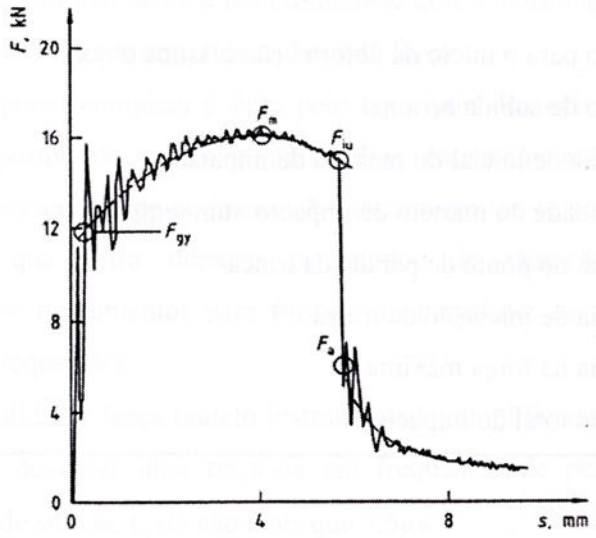


Figura 2.6 – Valores característicos de força do ensaio Charpy Instrumentado
(Fonte: International Standard Steel 14.556, 2000)

Tabela 2.1 - Símbolos e significados conforme a Norma ISO 14.556

Símbolo	Significado	Unidade
f_g	Limite da freqüência de saída	Hz
F	Força	N
F_a	Força no ponto de parada da trinca	N
F_{gy}	Força no escoamento plástico	N
F_{iu}	Força na iniciação da trinca	N
F_m	Força máxima	N
g_n	Aceleração da gravidade	m/s^2
H	Altura da queda do centro do pêndulo	m
KV	Energia absorvida como definida pela ISO 148-1	J
M	Massa efetiva do pêndulo	Kg

S	Deslocamento	m
s_a	Deslocamento no final da trinca	m
s_{gy}	Deslocamento no escoamento generalizado	m
s_{iu}	Deslocamento na iniciação da trinca	m
s_m	Deslocamento na força máxima	m
s_t	Deslocamento total	m
T	Tempo	s
t_o	Tempo para o início da deformação elástica do cdp	s
t_r	Tempo de subida do sinal	s
v_o	Velocidade inicial do martelo de impacto	m/s
v_t	Velocidade do martelo de impacto num tempo t	m/s
W_a	Energia no ponto de parada da trinca	J
W_{iu}	Energia de iniciação da trinca	J
W_m	Energia na força máxima	J
W_t	Energia total do impacto	J

O ensaio Charpy consiste em se medir a força de impacto, em relação à curva de deslocamento do corpo-de-prova, de acordo com a norma ISO148-1. A área sob da curva força-deslocamento define a energia absorvida pelo corpo-de-prova.

As curvas força-deslocamento para diferentes aços e diferentes temperaturas podem ser bastante diferentes. Entretanto as áreas sob a curva e a energia absorvida são idênticas. Se a curva força-deslocamento é dividida dentro de partes características, várias fases do ensaio com características semelhantes podem ser deduzidas para fornecer informações consideráveis sobre o comportamento à fratura do corpo-de-prova. A curva força deslocamento não pode ser usada nos cálculos de tensões de estruturas.

A Norma diz que deve ser usada uma máquina de ensaio de impacto, de acordo com a norma ISO148-2, e instrumentada, para determinar a curva força-tempo ou força-deslocamento.

Podem ser feitas comparações da energia total de impacto instrumentado, W_t, a partir da instrumentação com a energia absorvida indicada pelo dial (relógio mostrador) da máquina, KV. Se as divergências entre os valores lidos na máquina e os valores calculados excederem ± 5J, deve ser investigado:

unesp

a) o atrito do sistema mecânico da máquina;

b) a calibração do sistema de medidas;

c) o programa utilizado.

Todos os instrumentos utilizados na cadeia de medida devem ser calibrados seguindo as normas e procedimentos tanto nacionais como internacionais de medida.

A medida de força normalmente é feita usando-se dois extensômetros ativos (strain gages) colados no cutelo original, para formar o transdutor de força.

Um circuito de ponte completa é feito pelo equilíbrio dos extensômetros (strain gages) colados em lados opostos do cutelo e pelos dois extensômetros passivos que farão a compensação. Os extensômetros de compensação não devem ser colados em nenhuma parte da máquina de ensaio que sofra impacto ou efeitos de vibração. Podem ser usados, alternativamente, outros instrumentos para formar um transdutor de força, que satisfaçam os níveis de desempenho requeridos.

O sistema de medida de força (cutelo instrumentado, amplificador, sistema de aquisição e tratamento de dados) deve ter uma resposta em freqüência de pelo menos 100KHz, que corresponde ao tempo de subida, t_r, de não mais que 3,5μs.

A avaliação dinâmica da medida da força encadeada pode ser simplificada pela medida dos valores de pico iniciais. Pela experiência, a cadeia de medida dinâmica pode ser considerada satisfatória se o corpo-de-prova de aço com entalhe em V apresentar um pico inicial maior que 8kN, para uma velocidade de impacto entre 5m/s e 5,5m/s. Isto é válido, se o centro dos extensômetros ativos estiverem de 11mm até 15mm afastados do ponto de contato do martelo.

A instrumentação do cutelo deve ser designada para cobrir o intervalo nominal exigido para a força. O cutelo instrumentado deve ser projetado para minimizar sua sensibilidade para carregamentos não simétricos.

Experiências mostram que em corpos-de-prova com entalhe em V, forças nominais de impacto entre 10KN e 40KN ocorrem para todos os tipos de aços.

A calibração do sistema de aquisição de dados deve ser na prática, realizada estaticamente, de acordo com a acuracidade requerida.

É recomendado que a força de calibração seja feita com o cutelo instalado dentro do conjunto do martelo. A força é aplicada no cutelo por uma máquina de carregamento equipada com uma célula de carga calibrada e usando-se um bloco suporte especial na posição. Este bloco suporte deve ter alta dureza e seus parâmetros relevantes devem estar de acordo com o corpo-de-

unesp

prova Charpy V. As condições de contato devem ser aproximadamente iguais, no sentido de fornecer resultados reprodutíveis. O exemplo do bloco suporte para a calibração de um cutelo de ponta de 2mm é dado no Anexo 1.

A linearidade estática e o erro de histerese na construção do martelo instrumentado, incluindo todas as partes do sistema de medida até o sistema de armazenamento de dados, deve estar dentro de ± 2% da força medida, quando a faixa da força nominal estiver entre 50% e 100%, e dentro de ±1% do fundo de escala dos valores de força, quando a faixa da força nominal estiver entre 10% e 50% (veja Figura 2.7). Para a instrumentação do cutelo sozinho, é recomendado que a acuracidade seja ± 1% dos valores medidos entre 10% e 100% da força nominal.

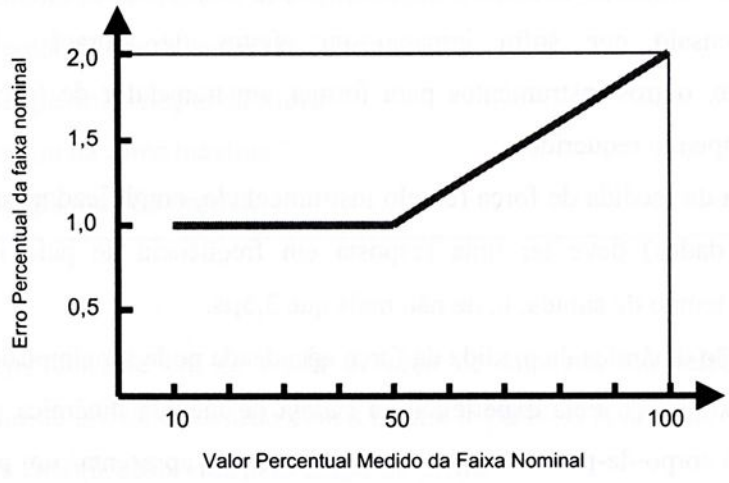


Figura 2.7 – Erro Permissível de Valores Registrados dentro de uma Faixa de Força Nominal.
(Fonte: International Standard Steel 14.556, 2000)

A calibração do sistema de medida de força pode ser feita estaticamente aplicando-se ao martelo pendular uma força conhecida, desde que este esteja devidamente montado num aparato que represente as mesmas condições do ensaio. Para tanto, são recomendadas construções de dispositivos de apoio e fixação do martelo com características próprias, tais como rigidez, rigor dimensional e tolerâncias de forma adequada.

Por se tratar de um sinal transiente, o sistema preferível de gravação da curva força-tempo é um gravador com armazenagem digital, contendo interface eletrônica para tratamentos dos dados via computador e conversor analógico-digital de no mínimo 8 bits, com uma taxa de amostragem de 250KHz. Um sistema de gravação de 12 bits 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 não puder ser medido diretamente no ensaio, é possível determinar a curva força - deslocamento equivalente. A relação força - 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:

$$V(t) = V_0 - \frac{1}{m}\int_{t_0}^{t} F(t)dt \tag{2.3}$$

e

$$S(t) = \int_{t_0}^{t} V(t)dt \tag{2.4}$$

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 de início de deformação do corpo-de-prova.

A violação de qualquer um dos procedimentos gerais trarão resultados não verdadeiros, de acordo com a norma ISO. A instrumentação permite separar as duas componentes de energia e medir a força aplicada por todo o evento da fratura, mas não permite que se determine diretamente a componente responsável pela iniciação da trinca para casos dúcteis.

A avaliação da curva força - deslocamento para a determinação das forças utilizadas nos cálculos da tenacidade é feita considerando-se a classificação dos diversos formatos de sinais, enquadrada 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 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. Por último, na curva do tipo F, a energia localiza-se no patamar superior.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

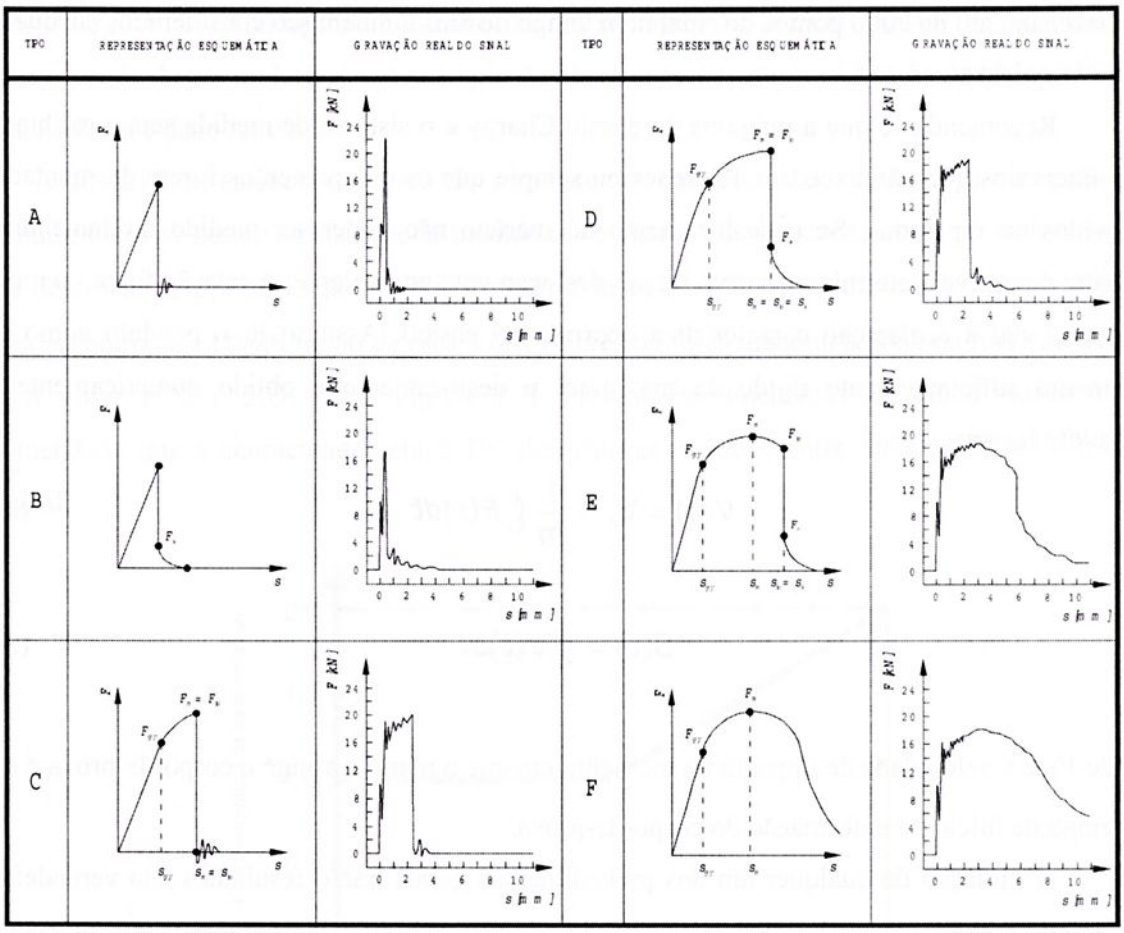


Figura 2.8 – Curvas características força - deslocamento classificadas pela norma ISO.

2.5 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). Existe 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 são 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 desta 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 alcançada 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 médico-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 medida de deformações podem ser resumidas da seguinte forma (Dally et al., 1993):

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

unesp

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 medidas. 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 ou 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 apresentam em seus sistemas de codificação praticamente todas as informações necessárias à escolha de um dado extensômetro. Utilizando letras e números seqüenciais 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 sujeitos 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

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

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.

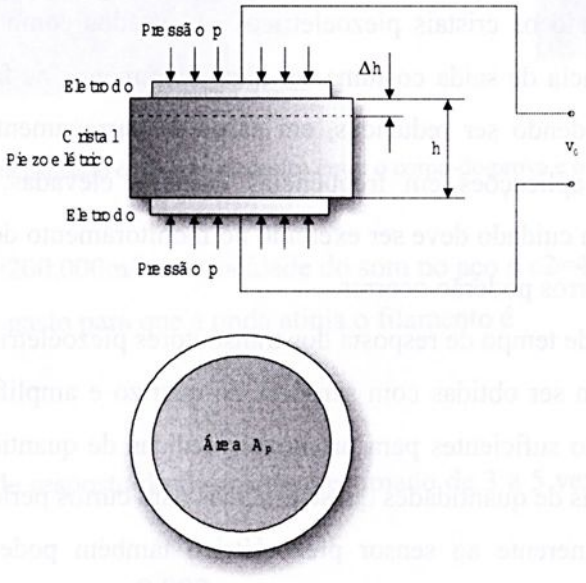


Figura 2.9 - Deformação de um cristal piezoelétrico devido à pressão aplicada.
(Fonte: Dally et al., 1993)

Muitos cristais piezoelétricos são fabricados considerando-se um único cristal de quartzo, porque é um dos materiais piezoelétricos mais estáveis. Suas propriedades são: módulo de elasticidade, 86GPa; resistividade, $10^{12}\Omega$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 se tornam 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. Grandes alongamentos e um módulo de elasticidade elevado, da ordem de 120GPa tem sido observados. 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 mecânica é aplicada nos eletrodos e a liga titânio-bário se deforma, liberando energia para prover a medida.

Muitos transdutores exibem uma impedância de saída relativamente baixa, na faixa de 100 a 1000Ω. 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 10kΩ, com aplicações em freqüências bastante elevadas. Com essa impedância excessivamente alta, um cuidado deve ser exercido no monitoramento do nível de tensão elétrica 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 medidas 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 freqüência de ressonância do pequeno elemento cilíndrico piezoelétrico é muito grande. A freqüência 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 freqüência de resposta.

2.6 Extensômetro Elétrico e as Medidas Dinâmicas

Dally et al. (1991) revelaram que em aplicações dinâmicas de extensômetros torna-se importante o conhecimento de sua resposta à freqüência. Pode-se analisar isso de duas maneiras:

- Resposta do extensômetro na direção de sua espessura (quanto tempo leva para o elemento do extensômetro responder à deformação do corpo-de-prova abaixo dele);
- Resposta do extensômetro devido ao seu comprimento.

Pode-se estimar os tempos envolvidos, como mostra o exemplo da Figura 2.10. Uma frente de onda com velocidade c1 é propagada ao longo do corpo-de-prova ao qual o extensômetro está colado. Esta onda induz uma onda de tensão cisalhante com velocidade c2, a qual propaga através do elemento sensível do filamento do extensômetro. As frentes de ondas se propagam com velocidade do som no material.

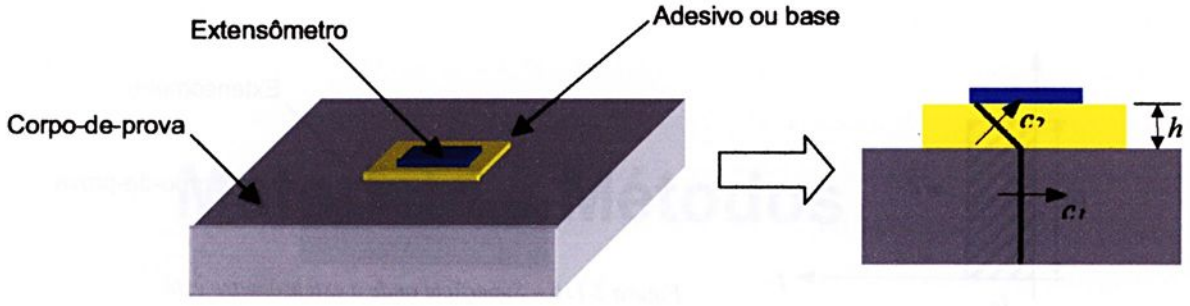


Figura 2.10 – Transmissão de tensão dinâmica entre o corpo-de-prova e o extensômetro.

Sendo c1=200.000m/s a velocidade do som no aço e c2=40.000m/s velocidade do som no adesivo, o tempo gasto para que a onda atinja o filamento é

$$t = \frac{h}{c_2} \tag{2.5}$$

O tempo de resposta do filamento é estimado de 3 a 5 vezes o tempo anterior. Se h=0,002m, então,

$$t = \frac{0{,}002}{40.000} = 5 \cdot 10^{-8} s \tag{2.6}$$

A resposta será aproximadamente T=2.10-7s.

A influência do comprimento do extensômetro sobre a resposta dinâmica pode ser analisada desde que se despreze o tempo de resposta na passagem da frente de onda(T=2.10-7s). A análise será feita considerando inicialmente que a excitação é um pulso, e posteriormente a excitação é uma onda senoidal.

Seja a excitação por pulso como mostra a Figura 2.11a, sendo lo o comprimento do extensômetro, e o tempo de transito

$$t_t = \frac{l_o}{c} \tag{2.6}$$

A Figura 2.11c mostra que tt=2to (saída); A é a energia gasta no ciclo. Se extensômetro sente a média da deformação no seu comprimento, sua saída decresce linearmente até o valor εo/2 num tempo to, em seguida fica constante εo/2 durante to, e depois decresce linearmente a zero.

O efeito do comprimento neste exemplo foi diminuir a amplitude do sinal de um fator 2 e aumentar a duração de um fator 3.

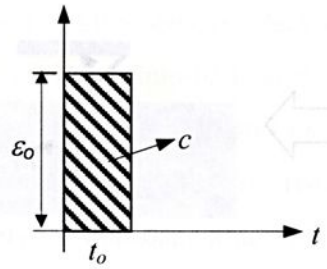


Figura 2.11a – Excitação Pulso

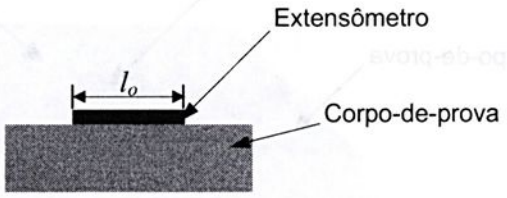


Figura 2.11b – Superfície onde o extensômetro está aderido

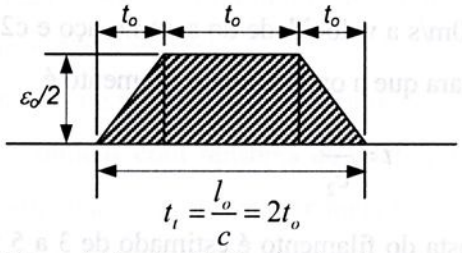


Figura 2.11c – Saída do extensômetro

Figura 2.11 – Resposta Dinâmica de um extensômetro para excitação por pulso.

A distorção do pulso depende da relação tt/to e quando tt/to→0, a distorção vai a zero. Como c é constante para o material tt=lo/c pode-se controlar este efeito escolhendo l_o conveniente. Conclui-se que a leitura é em termos de média e conforme aumenta em relação à velocidade de frente da onda, aumentará o tempo de resposta, e a amplitude de saída será menor.

Materiais e Métodos

3.1 Materiais

Os materiais metálicos que constituíram todos os corpos de prova são apresentados neste item. Foram escolhidos materiais metálicos distintos: aços SAE 1020, 1040, ABNT 4140 e uma liga de alumínio 7050 e. Essa adoção foi fundamentada no fato de os materiais apresentarem propriedades mecânicas distintas, dentre as quais cita-se a ductilidade, limite de resistência e a tenacidade à fratura, o que permitiu uma melhor avaliação do sistema de medida adotado.

Três etapas distintas constituíram a fase experimental do trabalho. A primeira representou uma fase de testes e ajustes preliminares no Amplificador/Condicionador Dinâmico de Sinais, desenvolvido em parceria com o Laboratório de Qualidade e Conservação de Energia Elétrica/FEIS/UNESP. O principal propósito foi avaliar se a resposta em freqüência do aparelho estava suficientemente rápida para o ensaio Charpy Instrumentado. Vale ressaltar que a resposta em freqüência da cadeia de medição recomendada pela norma deve ser acima de 100kHz. Essa etapa foi toda desenvolvida utilizando-se o martelo pendular de Delforge (1994). A forma de avaliar a resposta do aparelho é mediante a integração da curva força-deslocamento estimado e comparar com o valor de energia de impacto (tenacidade) lida diretamente no dial da máquina.

A segunda etapa refere-se à utilização de uma nova resposta em freqüência do condicionador de sinais, acima de 200kHz e com ganho de 100 vezes do aparelho, e à utilização de dois martelos distintos instrumentados conforme a norma. Nesta etapa, o principal objetivo foi avaliar novamente o condicionador de sinais e a geometria do martelo nos sinais de força-tempo.

Finalizando, a terceira etapa, refere-se ao uso 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

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

capítulo. A comparação dos sinais força-tempo provenientes das distintas cadeias de medição também foi o principal foco desta etapa 3. Nesta etapa, os ensaios foram conduzidos de forma simultânea para que uma comparação dos sinais medidos pudesse ser realizada. Ressalta-se que os equipamentos das etapas serão melhores especificados nos itens 3.2.2, 3.3.2 e 3.4.2.

Nas duas etapas iniciais todos os materiais foram ensaiados. Todavia, o aço 1020 não foi ensaiado na terceira 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 piezoelétrico. Sendo assim, os seguintes materiais foram utilizados na etapa 3: aços SAE 1040 e liga de alumínio 7050.

Foi implantado um controle da retirada de todos os corpos de prova do material bruto, bem como do posicionamento do entalhe. Os entalhes foram usinados segundo a direção L-T para minimizar o efeito da anisotropia nos corpos-de-prova.

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, no obtenção de sua curva de calibração e no ensaio Charpy instrumentado. Cabe enfatizar que o método mais eficaz de avaliação do aparelho é a comparação dos valores de tenacidade à fratura calculados por integração numérica da curva força em função do deslocamento estimado e dos valores de tenacidade lidos no dial da máquina de ensaio.

3.2.1 Descrição da Instalação Experimental

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

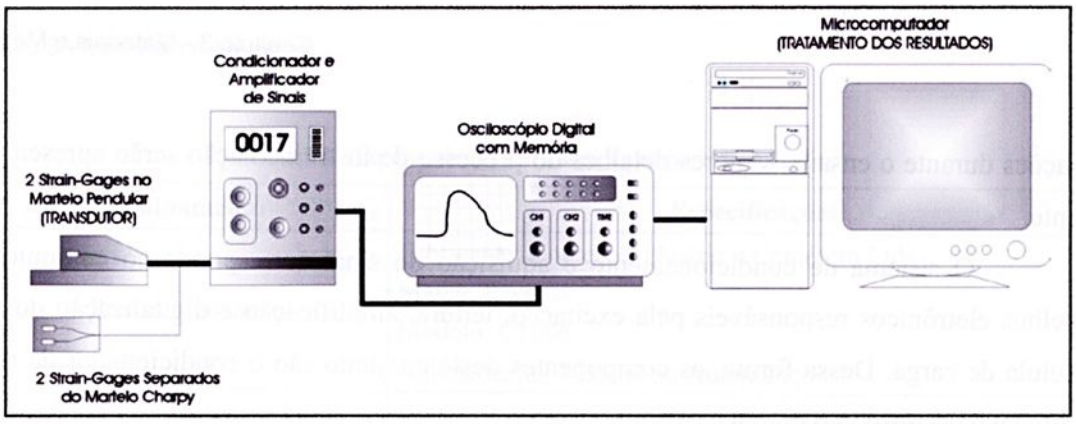


Figura 3.1 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 1 do trabalho.

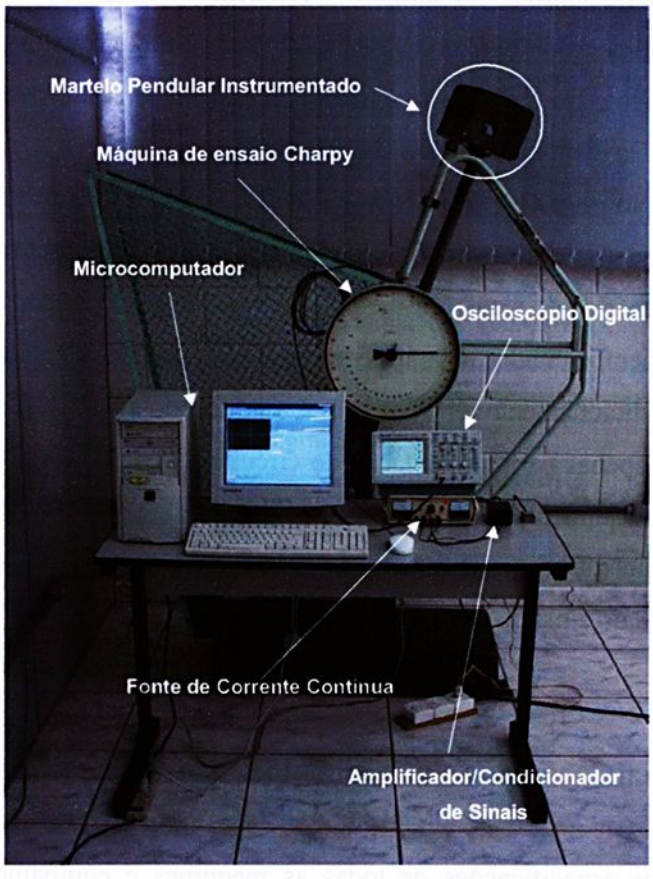


Figura 3.2 - Montagem experimental empregada na etapa 1 do trabalho.

O martelo pendular que foi utilizado nesta etapa era provido de diafragma de 1,0mm no interior de seu corpo. Este martelo foi transformado numa célula de carga ou transdutor de força, pois a função era transforma o sinal de deformação elástica em voltagem. Utilizando princípios de extensometria, dois extensômetros elétricos de resistência foram colados no martelo e outros dois foram colados em uma peça do mesmo material, porém ausente de

vibrações durante o ensaio. 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-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/amplificação 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 freqüência 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 3.1, a seguir. A prensa mecânica em conjunto com o anel dinamométrico contribuíram para execução dos procedimentos essenciais de calibração estática da célula de carga. O condicionador de sinais, o osciloscópio digital, o microcomputador e a máquina de ensaio Charpy fizeram parte do ensaio instrumentado.

Tabela 3.1 - 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
Amplificador/Condicionador de Sinais do tipo DC	Fabricante: Protótipo desenvolvido pelo DEE/UNESP – Campus de Ilha Solteira Resposta em Freqüência: 125 kHz Voltagem de excitação de 10,24 Vdc e ganho de 31 vezes Sem atenuação de banda passante
Osciloscópio Digital de Tempo Real	Fabricante: Tektronix Modelo: TDS 220 Banda de Freqüência: 100MHz Interface: Porta de Comunicação RS232 ou GPIB Software de Aquisição: Wavestar - versão 2.01
Microcomputador	Memória RAM: 128 Mb Processador: Pentium - 500MHz Disco Rígido: 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
Fonte de corrente contínua	DC Power Supply Model 101 36 V/ 1 A DEGEM SYSTEMS

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 freqüência de resposta que o principal equipamento do sistema de medida poderia fornecer.

A calibração dinâmica do condicionador para extensometria consiste na obtenção da atenuação em amplitude da resposta de uma onda senoidal. Este teste dinâmico compreende duas etapas:

- Primeira etapa: **Determinação do ganho do aparelho**

A obtenção do ganho consiste em injetar um sinal do tipo degrau de amplitude conhecida e através da equação abaixo determina-se o ganho,

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} \tag{3.1}$$

V_{out} tensão lida na saída do condicionador e V_{in} tensão de excitação injetada no sinal.

Injetando-se vários valores da amplitude do sinal degrau dentro da faixa de trabalho do equipamento obtém-se a curva de calibração dinâmica do condicionador.

- Segunda etapa: **Determinação da resposta em freqüência do aparelho**

Este método consiste na injeção de um sinal senoidal de amplitude conhecida no condicionador e faz-se a leitura do sinal senoidal de saída. A freqüência do sinal senoidal é variada, obtendo-se a atenuação de saída associada a cada freqüência da seguinte forma:

$$Atenuação = \frac{V_{out}}{V_{out_{esperado}}} \tag{3.2}$$

onde,

$$V_{out_{esperado}} = V_{in} * K \tag{3.3}$$

K= ganho do condicionador.

Considere como resposta em freqüência do equipamento o valor da freqüência do sinal de entrada para o qual a atenuação seja no máximo 0,3dB. As curvas de calibração estão apresentadas no Capítulo Resultados.

3.2.4 Instrumentação do Martelo Pendular e Calibração para a Primeira Etapa

Para executar o ensaio objeto do estudo e avaliar a arquitetura de medição adotada nesta etapa, foram selecionados, como elementos sensitivos, 4 unidades de extensômetros metálicos elétricos de resistência EXCEL, do tipo PA-06-125AA-350-S, axial de resistência

elétrica igual a 350Ω. Aplicando os princípios e técnicas de extensometria, os extensômetros foram colados com adesivo comercial, que possui boa fixação mais vida útil curta. A fotografia a seguir revela detalhes do martelo denominado GC3M e a Peça Isenta de Vibrações (PIV) utilizados nesta etapa.

Figura 3.3 – Martelo GC3M e Peça Isenta de Vibrações(PIV).

A definição do local da colagem dos extensômetros foi feita observando-se as recomendações e os procedimentos da norma ISO. Três aspectos decidiram o local de colagem: local onde possa haver proteção dos extensômetros para que não ocorresse danos durante o impacto, a distância recomendada de 13 a 15mm do centro do extensômetro até a superfície de impacto e forma de ligação entre os extensômetros ativos e passivos. Essa ligação foi concretizada formando uma ponte completa ou de *Wheatstone*.

Dois rasgos de comprimento 30mm e largura 15mm foram usinados, um em cada face do martelo, próximos à região de impacto de 6,5mm. A profundidade dos rasgos resultou no centro do martelo, numa parede fina de 1,0mm de espessura, e em cada lado da parede recebeu um extensômetro elétrico. Um furo de 6,0mm foi usinado na parte traseira do martelo para locar os cabos de ligação. Outros dois extensômetros foram colados na peça isenta de vibrações recomendada pela norma. Esse transdutor foi nomeado de martelo GC3M.

A proteção dos extensômetros foi feita utilizando um silicone de cura neutra (cor cinza), o qual pode ser observado na Figura 3.4. Esse silicone, diferentes dos silicone de cura acética, não prejudica a grade do extensômetro.

Figura 3.4 – Martelo GC3M e Peça Isenta de Vibrações devidamente instrumentados.

A calibração estática do martelo GC3M foi feita observando os procedimentos de Rodrigues (2001), e o aparato experimental para a calibração será mostrado detalhadamente no item 3.3.2.

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. Umas das variáveis adicionadas foi a alteração nos componentes eletrônicos do Amplificador/Condicionador de Sinais. Essa modificação obteve um melhora significativa na resposta em freqüência do aparelho, além disso o ganho do aparelho pode ser ajustado e avaliado também.

Outra variável implementada nessa etapa foram os mecanismos de suporte do martelo pendular adotados na calibração estática na prensa mecânica. O método de calibração estática denominado Rodrigues utilizou o aparato experimental dos ensaios de Rodrigues (2001), e o Método Vidotto de calibração utilizou a massa do pêndulo como suporte para fixação do martelo. Os métodos Rodrigues e Vidotto serão detalhados oportunamente.

A última variável adicionada foi a construção de um novo martelo pendular, diferente do Martelo GC3M e semelhante ao martelo original da máquina, ao qual foi denominado Martelo ISO. A diferença do Martelo ISO para o martelo original da máquina estava na presença de um rasgo de 1,5mm de profundidade e 7,0mm de largura, próximo 6,5mm à região de impacto, para locar os extensômetros e os cabos de ligação. Ambos os desenhos dos martelos encontram-se na Figura A.1.3 e A.1.4 no Anexo 1. A instrumentação aplicada ao

Martelo GC3M na etapa 1 foi removida, e uma nova instrumentação foi elaborada, utilizando-se um adesivo adequado e de vida útil prolongada. O martelo ISO também foi instrumentado nos mesmos princípios do Martelo GC3M. A Figura 3.5 ilustra o martelo ISO.

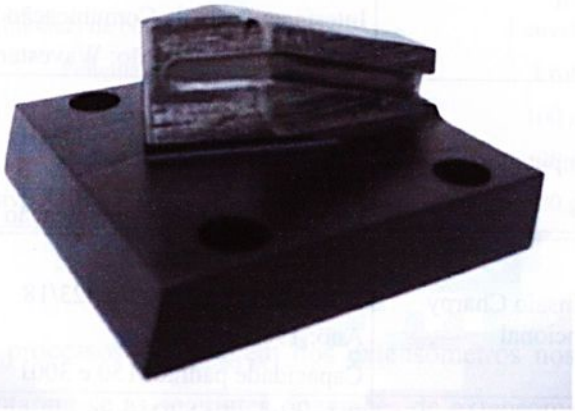


Figura 3.5 – Martelo ISO.

Analogamente à etapa 1, os ítens: *Descrição da Instalação Experimental, Especificação dos Equipamentos e a Curva de Resposta do Condicionador de Sinais* foram considerados na etapa 2. No item Especificação dos Equipamentos surge o emprego de uma estufa para o processo de cura do adesivo próprio para extensometria e a alteração no condicionador/amplificador dinâmico para extensometria. Nota –se também nesta etapa a falta da Fonte de Corrente Contínua que excitava o condicionador. Este equipamento foi retirado da cadeia de medição, pois o novo protótipo do condicionador já continha a fonte de excitação embutida.

Tabela 3.2 - Equipamentos utilizados na etapa 2 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
Amplificador/Condicionador de Sinais do tipo DC	Fabricante: Protótipo desenvolvido pelo DEE/UNESP – Campus de Ilha Solteira Máxima Resposta em Freqüência: 210 kHz Ganho de 100 ou 200 vezes Sem filtros de passa banda

Osciloscópio Digital de Tempo Real	Fabricante: Tektronix Modelo: TDS 220 Banda de Freqüência: 100MHz 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
Estufa para Processos de Cura	Fabricante: FANEN Modelo: 315/6

3.3.1 Instrumentação dos Martelos Pendulares da Máquina de Ensaio Charpy

Nesta etapa, foram selecionados, como elementos sensitivos, 4 unidades de extensômetros metálicos elétricos KYOWA do tipo KFG-3-350-C1-11, axiais de resistência elétrica igual a 349,4Ω±0,6 para cada martelo. 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° e fator de sensibilidade adequado, quando utilizado em células de carga fabricadas com materiais de alta resistência mecânica, Gage Factor igual a 2,11±1%. A seguir mostra-se a Tabela 3.3 e o conteúdo do material necessário para o processo de colagem dos extensômetros.

Tabela 3.3 - Material necessário para o processo de colagem dos extensômetros.

Item	Descrição	Quantidade
1	Gaze cortado	30 unidades
2	Fita Crepe	1 rolo
3	Conta-gotas de haste fina	4 unidades
4	Papel higiênico	1 rolo
5	Lixas d'água 220,320 e 400	1 unidade cada
6	Flanela	1 unidade
7	Terminal TF-8 KYOWA	1 pacote
8	Álcool Isopropílico	200 ml

9	Condicionador	100 ml
10	Neutralizador	100 ml
11	Fita Adesiva FK-1	1 rolo
12	Almofada de borracha de silicone	1 envelope
13	Película de Teflon	1 rolo
14	Solução de limpeza	100 ml
15	Resina de silicone	20 g
16	Adesivo KBR – EXCEL Sensores Ltda.	20 g

Em ambos os processos de colagem dos extensômetros nos martelos, tanto na etapa 1 como na etapa 2, adotaram-se as seguintes operações de extensometria. O processo de lixamento da superfície de colagem compreendeu em movimentos perpendiculares a cada troca de lixa, a partir da granulometria mais grossa até a mais fina. Objetivou-se promover uma superfície a mais isenta possível de riscos, condição necessária à etapa de colagem. A seguir apresentam-se os procedimentos utilizados para efetuar o processo de colagem dos extensômetros.

a) limpou-se a bancada com flanela embebida em álcool isopropílico;
b) limpou-se as pinças, facas de serra e quaisquer dispositivos de colagem com gaze embebido em álcool isopropílico;
c) limpou-se a superfície da peça com gaze embebida em álcool isopropílico;
d) preparou-se quimicamente a superfície da peça com gaze embebido em condicionador;
e) fixou-se a fita adesiva FK1 na placa de acrílico e cortou a fita com as dimensões dos extensômetros, na mesma quantidade deles para os seus posicionamentos na peça;
f) manipulando os extensômetros com o máximo cuidado, fixou-se uma pequena porção da fita adesiva FK1 na parte oposta à dos fios dos extensômetros, posicionando-os na superfície desejada;
g) passou-se cola na superfície da peça e na base dos extensômetros;
h) comprimiu-se os extensômetros junto à peça com pressão adequada fornecida pelo fabricante da cola;
i) levou-se à estufa FANEN, modelo 315/6, o conjunto martelo-dispositivo. A temperatura e tempo recomendados pelo fabricante da cola foi e 120 °C à 2 horas, para o processo de compressão. Para a descompressão pós cura o conjunto permaneceu a 120 °C por 2 horas;

j) retirou-se a peça do estufa e verificou-se visualmente se o posicionamento dos extensômetros estavam corretos;
k) colou-se os terminais próximos aos extensômetros;
l) soldou-se os fios dos extensômetros nos terminais utilizando solda de estanho;
m) soldou-se os fios do cabo de ligação (vermelho, verde, preto e amarelo) nos terminais apropriados, utilizando solda de estanho comum;
n) avaliou-se a resposta a uma solicitação de força imposta à peça, utilizando-se o indicador de deformação;
o) mediu-se as resistências da ponte de *Wheatstone* através de um multímetro, com o propósito de detectar possíveis danos durando o processo de aquecimento;
p) impermeabilizou-se os extensômetros utilizando resina;
q) Imobilizou-se a saída do cabo no martelo pendular com polímero expandido.

*Obs.: os procedimentos (i) e (j) não são assumidos na instrumentação da etapa 1, pois o adesivo não precisa de temperatura elevada para a cura.

Ambos os martelos foram instrumentados conforme a norma ISO 14.556, obedecendo a distância de 13 a 15mm do centro de fixação do extensômetro da face de impacto. Outro ponto destacável foi a construção de outra PIV(Peça Isenta de Vibração) conforme a norma, para o Martelo ISO. Em cada peça, dois extensômetros passivos foram colados para formar uma ponte completa com respectivos martelos. A Figura 3.6 apresenta os dois martelos e as peças isentas com os extensômetros devidamente colados.

3.3.2 Metodologias Adotadas para Calibração Estática dos Martelos Pendulares Instrumentados

Utilizando a prensa mecânica e o anel dinamométrico acoplado a ela, ambos apresentados na Tabela 3.2, e um relógio comparador, o ensaio de calibração compreendeu-se, portanto, na aplicação de um carregamento e descarregamento conhecido, através do anel dinamométrico, e sua correspondente verificação da resposta em Volts do transdutor de força(martelo). O bloco padrão foi pressionado contra o martelo, através do acionamento da prensa mecânica.

Figura 3.6 – Martelo ISO e Martelo GC3M e as respectivas peças isentas.

Duas metodologias foram destinadas para calibrar os martelos instrumentados. A primeira metodologia, denominada Método Rodrigues, foi baseada no emprego dos dispositivos utilizados por Rodrigues em sua dissertação de mestrado. A segunda denominada Método Vidotto, consistia em utilizar a massa do martelo para dar suporte ao martelo no momento da aplicação da carga. A primeira montagem experimental consistiu em fixar o martelo instrumentado segundo a norma ISO 14.556 à peça 3(Figura 3.7), e através da peça 2(Figura 3.7), fixá-lo à peça 1(Figura 3.7), e por fim fixar todo o conjunto ao anel, preso à prensa mecânica. O mesmo foi feito para o martelo instrumentado, segundo configuração proposta pelo GC3M(Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais), onde foi colocado um segundo relógio comparador para verificar se a carga estava sendo aplicada apenas no sentido normal ao transdutor de força, e essa montagem experimental pode ser vista na Figura 3.8.

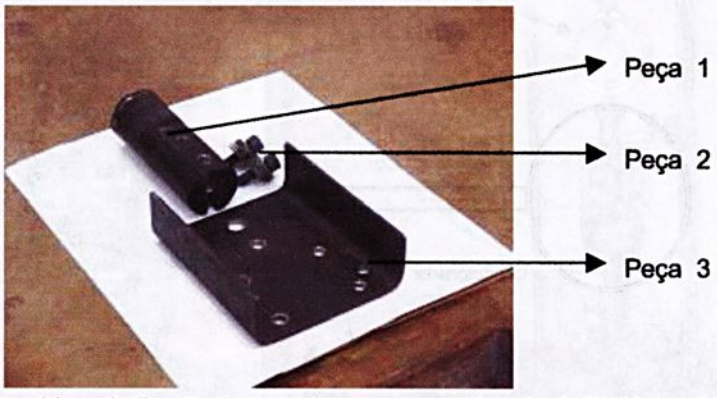


Figura 3.7 – Dispositivos de fixação dos martelos na prensa pelo método Rodrigues de calibração.

Já a segunda montagem experimental consistiu em colocar a massa total do pêndulo na parte de baixo da prensa, evitando assim o uso dos dispositivos de fixação do martelo. Essa montagem também foi feita para ambos os martelos instrumentados, e pode ser vista na Figura 3.9. A tentativa de se usar a massa total do pêndulo ao invés de apenas o martelo, visou obter

condições mais próximas das reais, como em um ensaio, e também um sistema mais rígido, pois evita o uso do dispositivo de fixação do martelo ao anel dinamométrico.

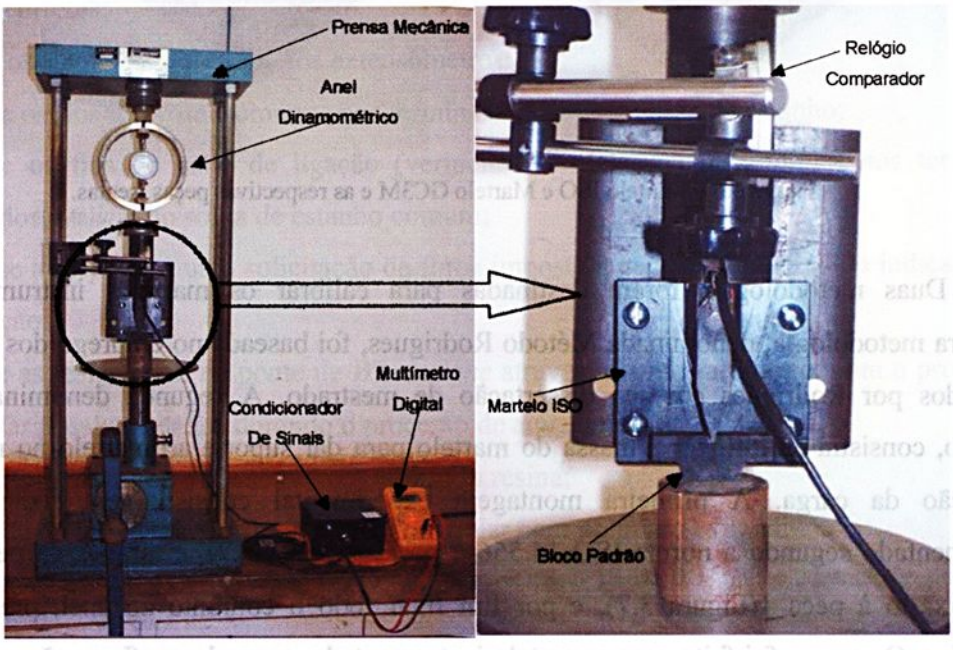


Figura 3.8 – Montagem Experimental para calibração no Método Rodrigues.

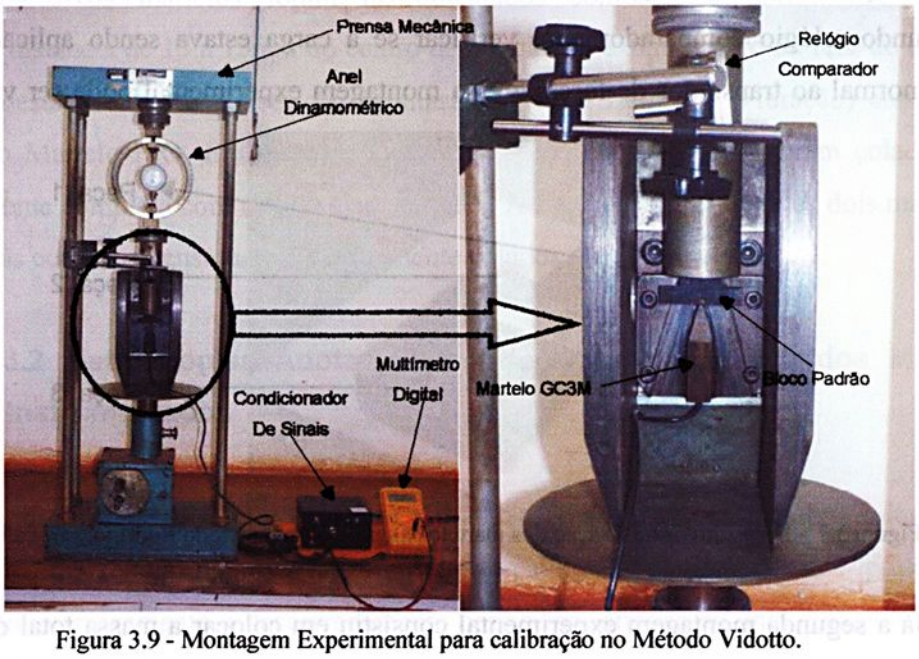


Figura 3.9 - Montagem Experimental para calibração no Método Vidotto.

Em ambas as montagens, os martelos foram colocados primeiramente na máquina de ensaio de impacto Charpy, para que se marcasse a posição exata do impacto ente o martelo e o corpo-de-prova. Para isso, o pêndulo foi levado lentamente até a posição de impacto, e em

seguida, com o auxílio de uma caneta para transparência, marcou-se a posição exata do impacto. No momento de efetuar a calibração estática, a marcação garantiu que o martelo esteve em contato com o bloco padrão na posição real de impacto, como no ensaio Charpy.

Assim, efetuaram-se 5 ensaios para cada montagem experimental, cada qual contendo 9 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. Os resultados dos ensaios podem ser vistos no capítulo a seguir.

Depois de efetuados os ensaios de calibração estática, foram feitos mais 3 ensaios para verificar a real importância de se realizar a calibração no exato ponto de contato do martelo com o corpo-de-prova. Estes ensaios foram realizados com os dispositivos utilizados por Rodrigues. Os resultados estão apresentados no capítulo a seguir.

Quanto aos materiais ensaiados não houve um controle rigoroso quanto à composição química das réplicas. Foram ensaiados materiais, sem qualquer tipo de tratamento mecânico ou térmico, em temperatura ambiente e 77K (nitrogênio liquido). Vale lembrar que o propósito é avaliar o comportamento da cadeia de medição do ensaio.

3.4 Metodologia - Etapa 3

Ademais, dois sensores dinâmicos, de funções piezoelétricas, fizeram parte desta terceira 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.

3.4.1 Descrição da Instalação Experimental

Analogamente à etapa 2., todo o aparato experimental foi mantido, apenas acrescido do novo conjunto de transdutores piezoelétricos e condicionadores de alta freqüência de resposta. Portanto, a máquina de ensaio Charpy estava duplamente instrumentada, isto é, por

unesp

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 a utilização simultânea de dois tipos distintos de células de carga, com princípios diferenciados de funcionamento e posições distintas na máquina.

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

Após uma verificação do comportamento dos transdutores piezoelétricos, avaliada por Rodrigues (2001), 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 4442, forneceu a medida da reação dos corpos de prova. A Figura 3.10 mostra de maneira ilustrativa o sistema de medida piezoelétrico aplicado na terceira etapa do processo de aquisição de sinais e a Figura 3.11 apresenta a montagem experimental.

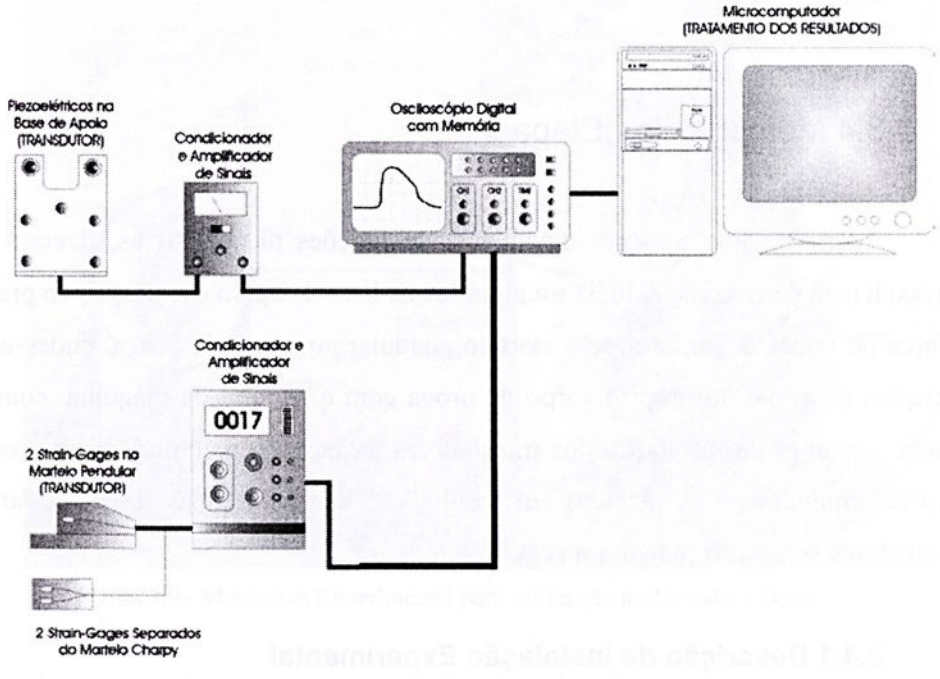


Figura 3.10 - Desenho esquemático do sistema de medida utilizado na etapa 3 do trabalho.

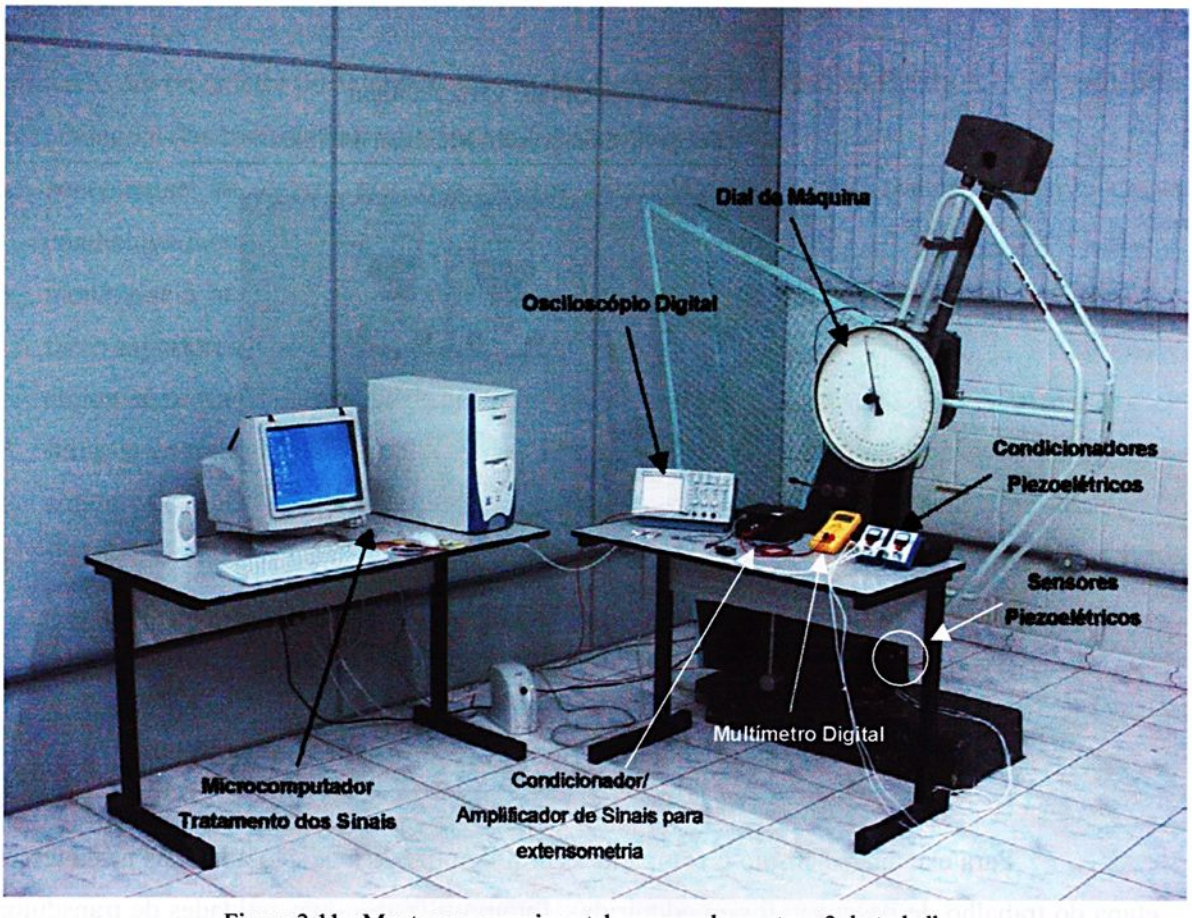


Figura 3.11 - Montagem experimental empregada na etapa 3 do trabalho.

3.4.2 Especificação dos Equipamentos

Os equipamentos necessários à continuidade do trabalho da primeira etapa são apresentados abaixo na Tabela 3.3, que contém 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. A Figura 3.12 apresenta os sensores e os condicionadores.

Tabela 3.4 - Equipamentos utilizados na etapa 3 do trabalho.

Equipamento	Especificações
Condicionador e Amplificador de Sinais	Fabricante: PCB Piezotronics Inc. Modelo: 480E09 Freqüência de Resposta: 0,15 a 100kHz Ganho: x1, x10 e x100
Transdutor de Força	Fabricante: PCB Piezotronics Inc. Modelo: M200B05

	Dimensões Gerais: ∅16,5 x 8mm
	Força de Compressão Máxima: 44,48kN

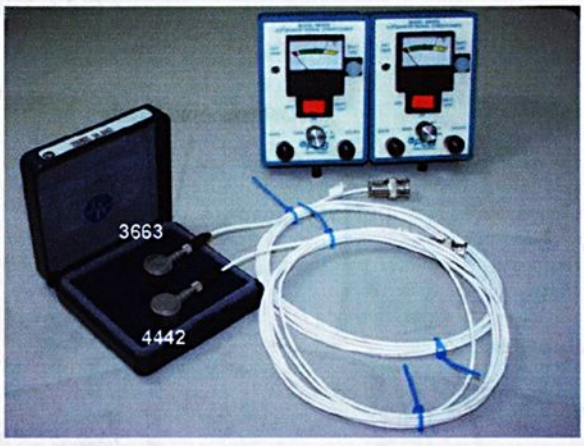


Figura 3.12 – Sensores Piezoelétricos e Condicionadores de Sinais

3.4.3 Instrumentação da Base de Apoio dos Corpos de Prova

Para executar o ensaio e comparar as arquiteturas de medição adotadas nesta terceira etapa do trabalho de pesquisa, foram adquiridas, foram utilizadas duas unidades de transdutores piezoelétricos modelo M200B05, descritos no item anterior. Os números 3663 e 4442 são identificações do fabricante e adotadas neste trabalho. Os sensores são idênticos e diferem apenas no fator de calibração.

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

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, consequentemente, maior rigidez do componente nessa região crítica.

Utilizou-se, portanto, o aço baixa liga SAE 8640 e a peça foi usinada com as devidas modificações para alojar os transdutores. Um tratamento térmico de têmpera e revenimento foi realizado, atingindo-se 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 3.13. 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.

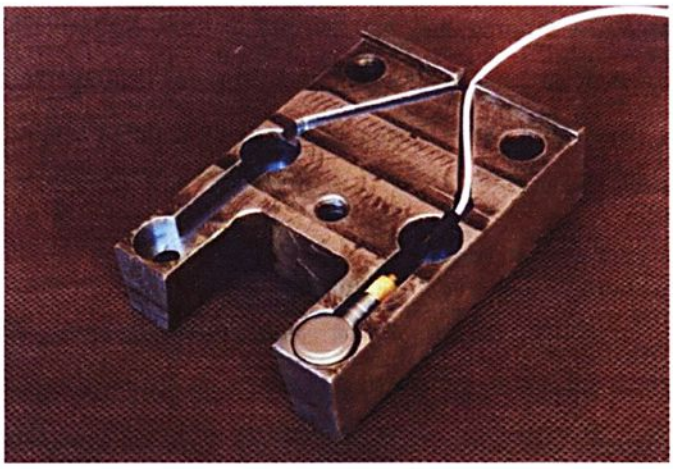


Figura 3.13 – Base de apoio munida de um sensor.

A Figura 3.14, mostra a fixação da base de apoio e dos transdutores na estrutura da máquina.

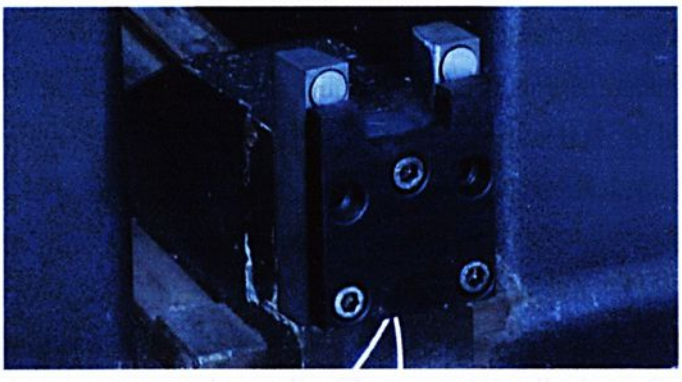


Figura 3.14 –Sensores Piezoelétricos locados na base da máquina de ensaio Charpy.

De posse de todo o aparato laboratorial, 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.

As cartas de calibração foram cedidas pelo fabricante PCB e não houve a necessidade de uma metodologia para a calibração dos sensores. As figuras A.1 e A.2, no Apêndice A, ilustram as curvas de calibração dos transdutores piezoelétricos. O canal 1 do osciloscópio foi utilizado para o transdutor nº 4442 e o canal nº 2 ao transdutor nº 3663.

3.5 Procedimentos de Ensaio observados por Rodrigues (2001)

A metodologia empregada na execução do ensaio Charpy instrumentado fundamentou-se basicamente nos procedimentos de Rodrigues (2001). Dentre eles, destacam-se 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, consequentemente, 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 reprodutilibidade 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, consequentemente, da tenacidade à fratura dinâmica aparente. Uma discussão sobre a usinagem do entalhe Charpy será detalhada no Capítulo 4.

Por fim, no sentido de minimizar o problema da anisotropia dos materiais metálicos ensaiados, os corpos de prova foram fabricados do mesmo lote e a na mesma direção de retirada

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

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 à geometria dos corpos-de-prova.

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, 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 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 uma 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 e tratamento dos dados

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 padrão da máquina, isto é, correspondente à energia de 300J;

- 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-tempo era capturada pela osciloscópio digital;
- 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, utilizando a linguagem de programação Matlab. Esta rotina foi especialmente elaborada para fornecer todas as informações possíveis sobre o sinal obtido, tais como curvas força em função do tempo, força em função do deslocamento estimado, força em função do tempo e energia calculada W_i[J] e força em função do deslocamento estimado e energia calculada W_i[J]. A rotina computacional se encontra na no Anexo 5.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

Resultados e Discussões

4.1 Descrição dos Resultados - Etapa 1

Nesta etapa preliminar do estudo evolutivo, foi possível conhecer o comportamento do condicionador de sinais dinâmico frente ao carregamento por impacto. O aparelho foi apto a ser utilizado logo após a análise dos dados fornecidos pelo Laboratório de Qualidade de Energia. Constava nos dados do aparelho, que a resposta em freqüência era de 125kHz e o ganho fixo em 31 vezes. Como transdutor, foi utilizado o martelo GC3M. A Figura 4.1 ilustra a carta de calibração para o Martelo GC3M utilizado por Delforge (1994) e a respectiva função linear que relaciona o nível de tensão captado e a força aplicada é dada pela expressão abaixo, que se denomina *equação de calibração estática da célula de carga*. Nota-se também a boa linearidade com base no coeficiente de linearidade próximo ao valor 1,0 (R^2=0,9985).

$$F = 0{,}0714.mV \qquad (4.1)$$

onde F é a força em kN e V é o nível de tensão em *milivoltagem(mV)*.

A Figura 4.2 apresenta o sistema de medição completo acoplado à máquina na etapa inicial da instrumentação do ensaio. Nota-se a presença da fonte excitadora do Condicionador/Amplificador de sinais, já na segunda etapa seria substituída por uma fonte interna no condicionador.

Da Figura 4.3 até 4.8 são resultados referentes a ensaios realizados a temperatura de 29°C em aços estruturais, como possivelmente, aço ABNT 1020, ABNT 1040 entre outros. Não houve um controle rigoroso na identificação dos corpos-de-prova, portanto a escolha do material foi aleatória.

A Figura 4.3(a) apresenta o sinal de força em função do tempo do aço com 19 Joules de energia absorvida lida na máquina. Na Figura 4.3(b) ilustra a curva força em função do deslocamento estimado.

unesp

Já na Figura 4.3(c) tem-se a curva força - deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento, e finalmente na Figura 4.3(d) a curva força - tempo e Tenacidade em função do tempo. O mesmo acontece para as Figuras 4.4 à 4.8.

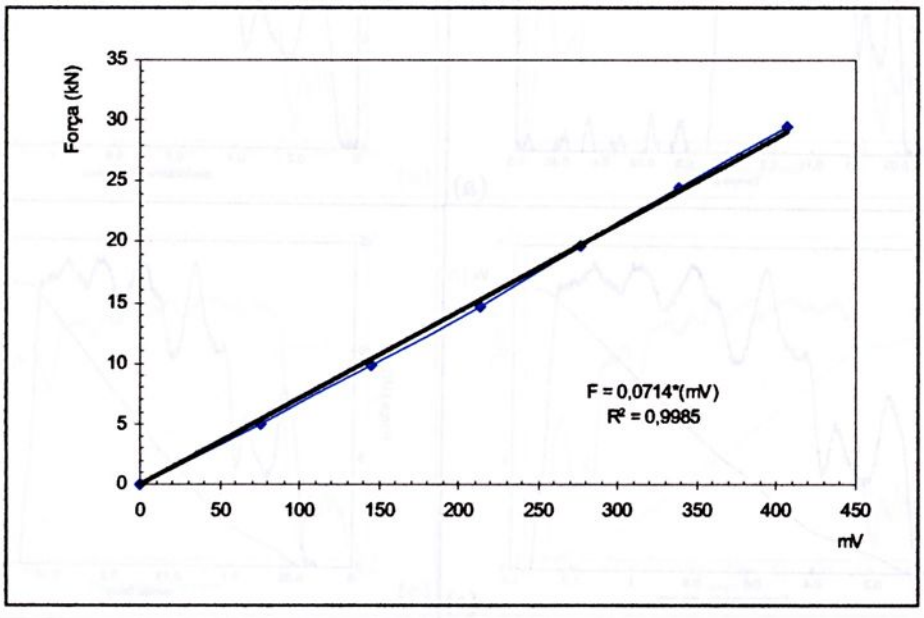


Figura 4.1 - Curva do ensaio de calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de Calibração na etapa 1.

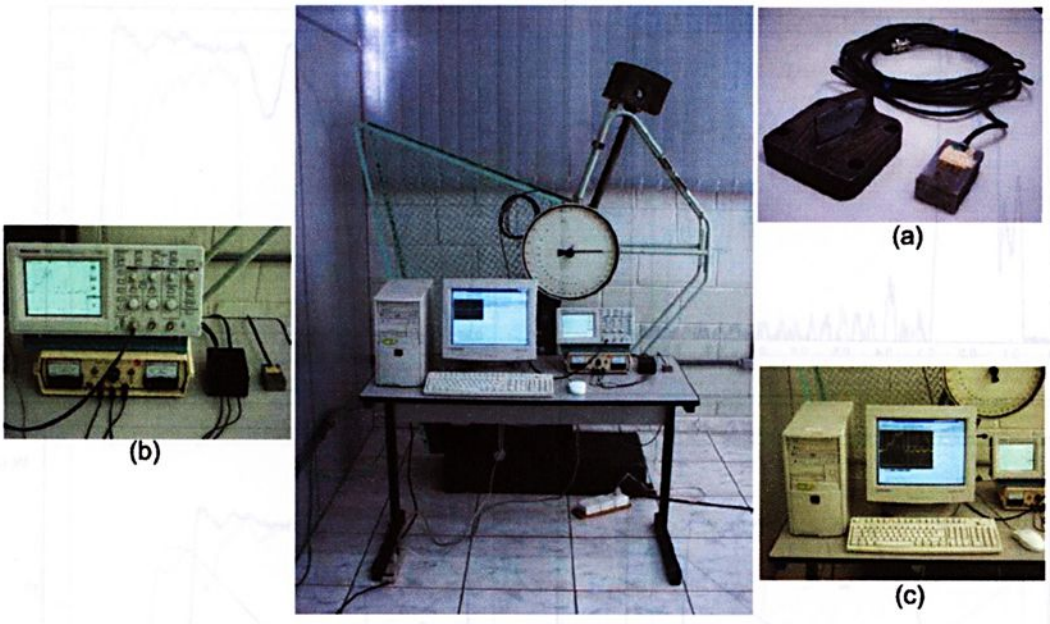


Figura 4.2 - Sistema de medição completo acoplado à máquina - (a) Detalhe do martelo e peça isenta; - (b) Detalhe do Osciloscópio e Condicionador; - (c) Detalhe do Microcomputador

Já na Figura 4.3(c) tem-se a curva força - deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento, e finalmente na Figura 4.3(d) a curva força - tempo e Tenacidade em função do tempo. O mesmo acontece para as Figuras 4.4 à 4.8.

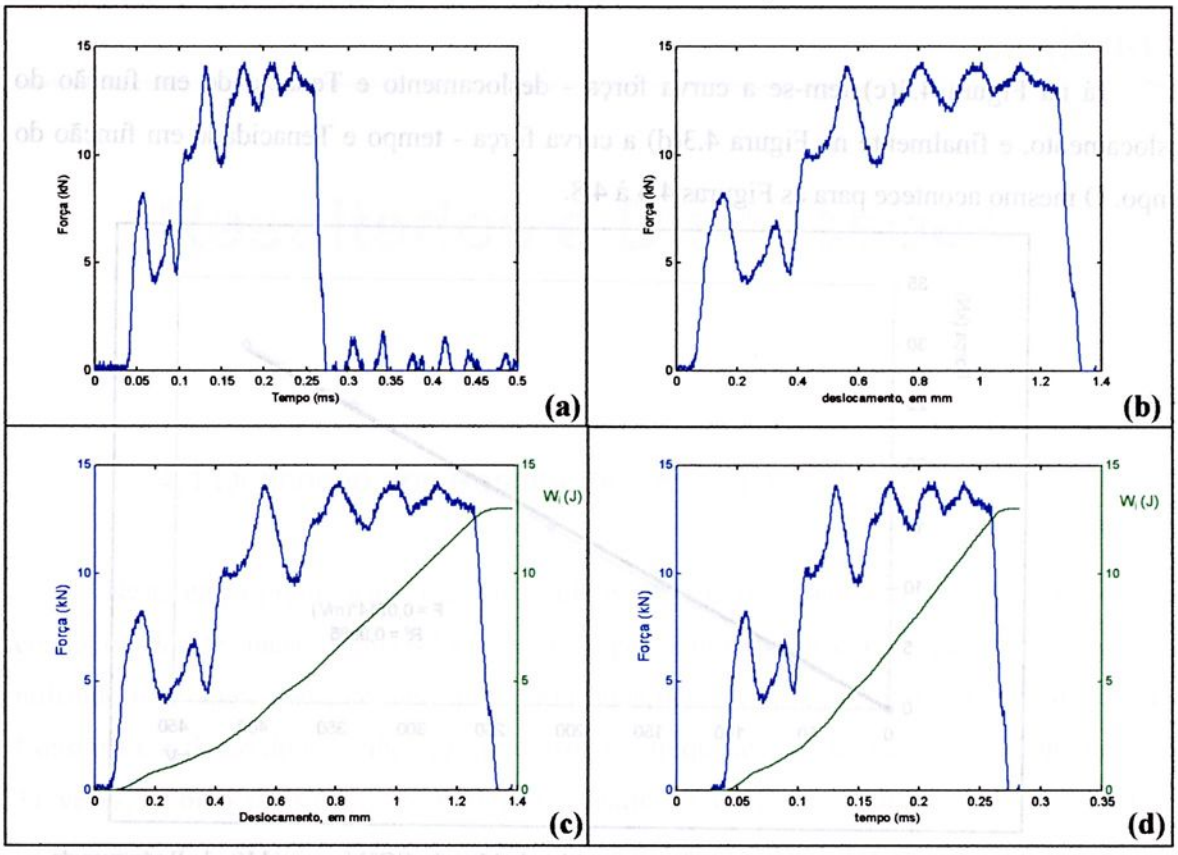


Figura 4.3 – Curvas do material ensaiado a temperatura ambiente com W_d=19J.

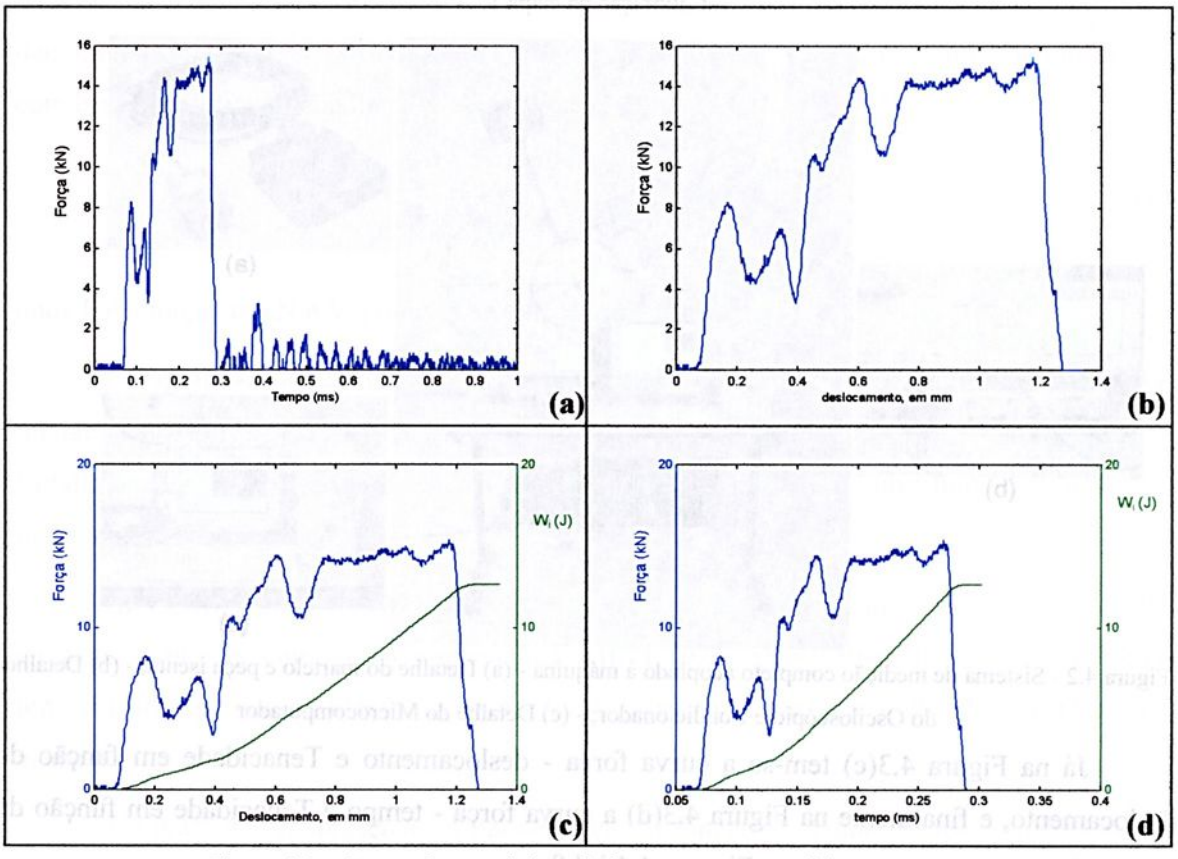


Figura 4.4 – Curvas do material ensaiado a temperatura ambiente com W_d=18J.

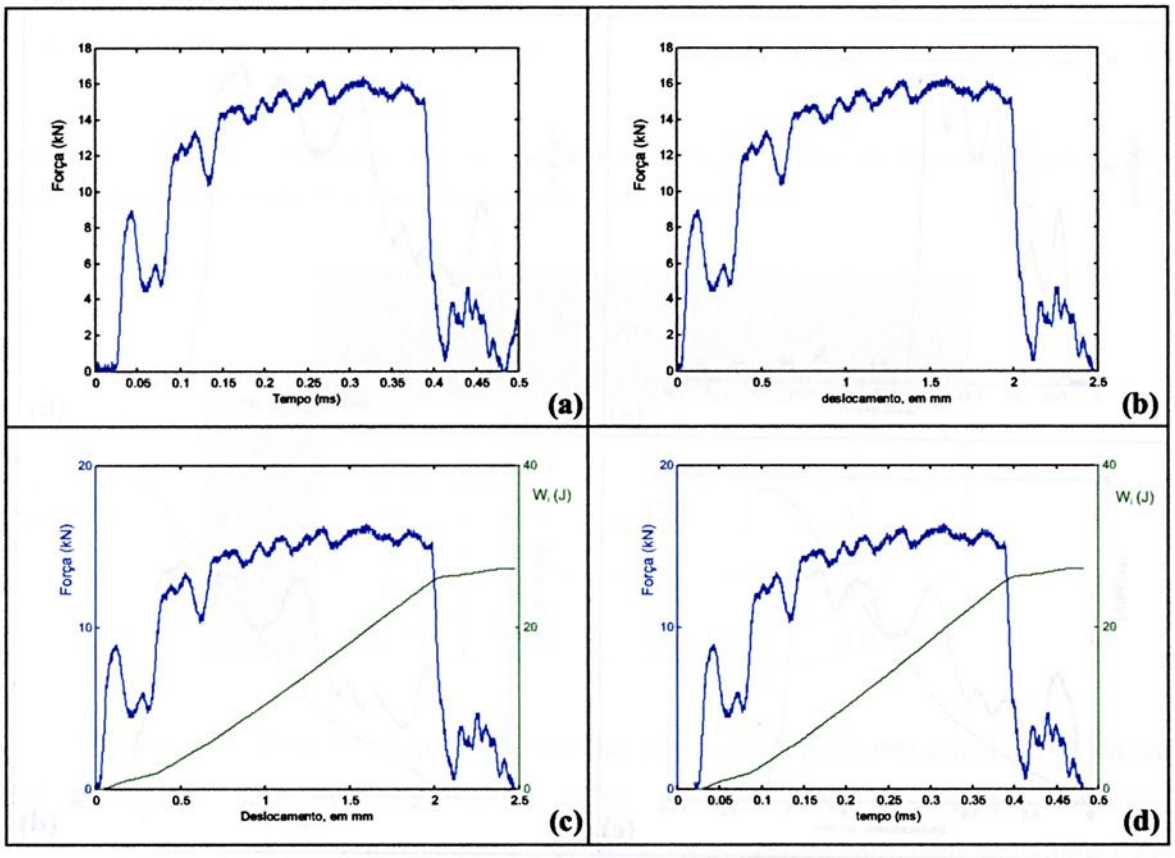


Figura 4.5 – Curvas do material ensaiado a temperatura ambiente com W_d=40J.

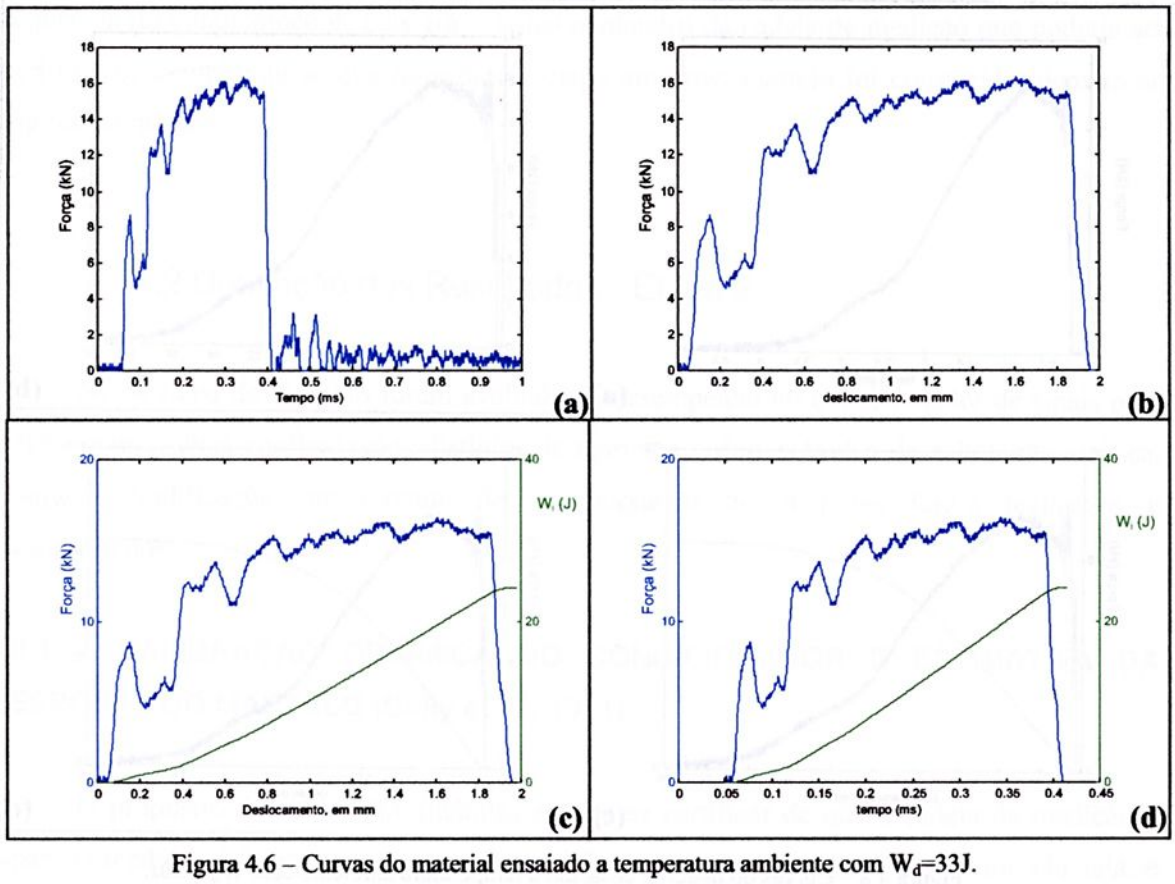


Figura 4.6 – Curvas do material ensaiado a temperatura ambiente com W_d=33J.

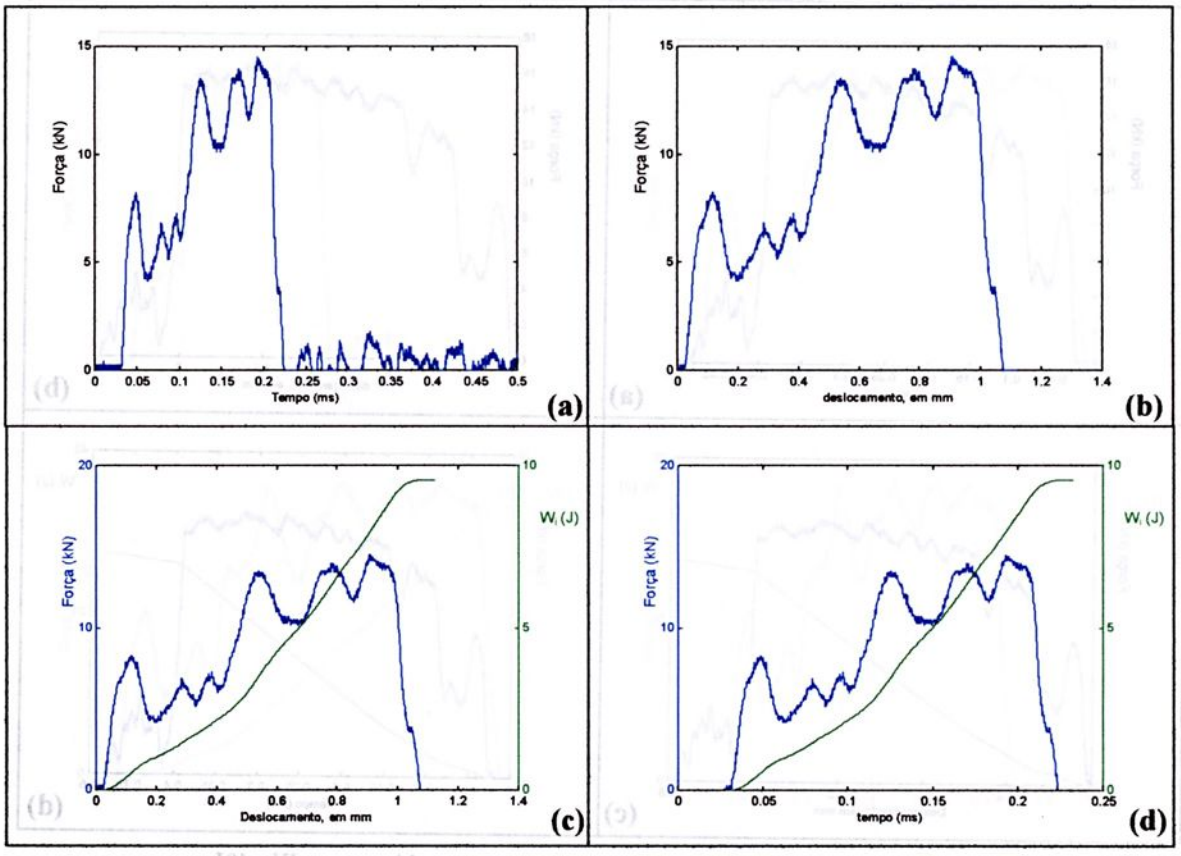


Figura 4.7 – Curvas do material ensaiado a temperatura ambiente com W_d=12J.

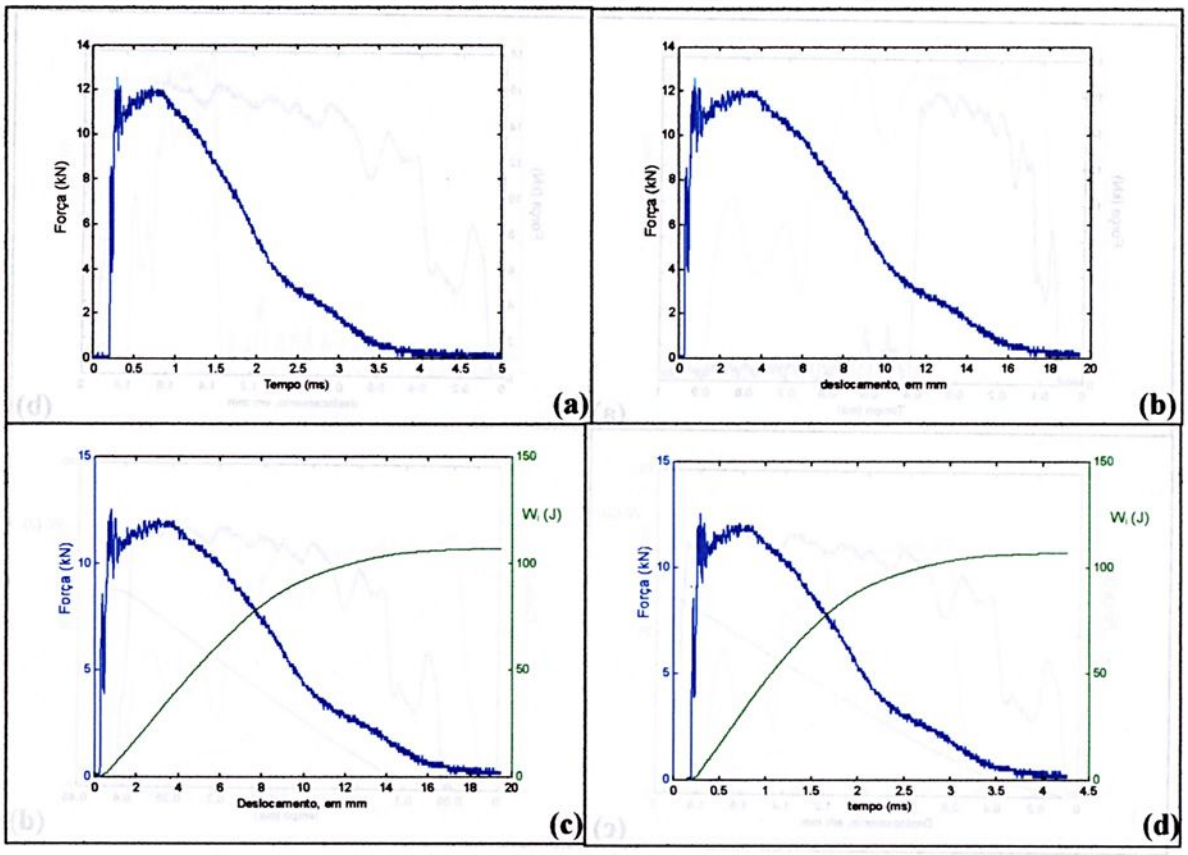


Figura 4.8 – Curvas do material ensaiado a temperatura ambiente com W_d=120J.

Tabela 4.1 – Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(W_d) e obtidos por integração numérica (W_i), observando apenas o Martelo ISO e o Método Rodrigues de calibração estática.

	W_d [Joules]	W_i [Joules]	$(W_d - W_i)$ [Joules]	$(W_d - W_i)/W_i$ [%]
Martelo GC3M	19	13,2	6,2	46,9
	18	12,5	6,5	52
	40	27,2	12,8	47
	33	25,8	7,2	27,9
	12	9,2	3,2	34,8
	120	109,5	10,5	9,6

Nota-se pela tabela acima que para materiais frágeis a diferença percentual envolvida era bem maior que para materiais dúcteis. Neste caso a cadeia de medição respondia satisfatoriamente para materiais que tinham um tempo de interação entre o corpo-de-prova e o martelo maior que 3,0ms. A atenção do estudo a partir desta etapa mirou-se para a resposta em freqüência do condicionador, pois era o único parâmetro da cadeia de medição que poderia ser modificado. Lembrando-se que na próxima etapa um novo martelo foi construído idêntico ao original da máquina.

4.2 Descrição dos Resultados - Etapa 2

Nesta etapa do trabalho foram avaliados o desempenho do condicionador de sinais para extensometria, duas configurações distintas de martelos e dois métodos de calibração estática. Após as modificações no circuito do condicionador novos testes foram realizados e acompanhados.

4.2.1 – CALIBRAÇÃO DINÂMICA DO CONDICIONADOR E ESTIMATIVA DA RESPOSTA DO MARTELO (Dally et al., 1991)

O propósito da calibração dinâmica é o de se certificar de que a cadeia de medição é capaz de medir satisfatoriamente a variação da força durante o processo de fratura. Ou seja, é

preciso que a cadeia de medição tenha um tempo de resposta suficientemente rápido quando comparado com o tempo de duração do processo de fratura que se deseja monitorar.

Conforme a metodologia apresentada no item 3.2.3 e a revisão bibliográfica do item 2.6, foi possível calcular a resposta em freqüência do condicionador conforme o ganho e estimar o tempo de resposta ao impacto do martelo.

O tempo de resposta do martelo foi estimado considerando-se apenas o tempo necessário para uma onda percorrer o martelo do ponto de impacto com o corpo-de-prova até atingir o extensômetro elétrico. O tempo total, t, é determinado pela somatória dos tempos gastos para que a onda de choque percorra um trecho do martelo, $t_{aço}$, mais o trecho do adesivo, t_{ad}.

A velocidade do som no aço(material do martelo), é de $V_{aço}$=200.000in/s ou 5000m/s, e V_{ad}=40.000in/s ou 1000m/s é a velocidade do som no adesivo.

O tempo de propagação da onda de tensão no martelo, $t_{aço}$,

$$t_{aço} = \frac{h_{aço}}{V_{aço}} = \frac{15*10^{-3}}{5000} = 3{,}0*10^{-6}\,s$$

onde, $h_{aço}$ percurso da onda de choque no martelo – estimado em 15mm.

O tempo de propagação da onda de tensão na camada de adesivo, t_{ad},

$$t_{ad} = \frac{h_{ad}}{V_{ad}} = \frac{0{,}05*10^{-3}}{1000} = 5{,}0*10^{-8}\,s$$

onde, h_{ad} percurso da onda de choque na camada de adesivo – estimado em 0,05mm.

Portanto o tempo total, t, é igual a,

$$t = t_{aço} + t_{ad} = 3{,}0*10^{-6} + 5{,}0*10^{-8} = 3{,}05*10^{-6}\,s$$

Todavia, analisando-se melhor, há quem admita que tal valor não representa propriadamente o tempo de resposta do martelo e, sim, o tempo de atraso entre o instante do impacto martelo/corpo-de-prova e a deformação no extensômetro.

Dos elementos que constituem a cadeia de medição ainda merece uma destaque o condicionador de sinais. Este equipamento é o elo de ligação para se conhecer o comportamento da curva do material ensaiado. Sua função é amplificar o sinal proveniente dos extensômetros, o qual é digitalizado no osciloscópio. Senão assim, é necessário conhecer a resposta em freqüência do aparelho.

A Figura 4.9 apresenta resultados dos ensaios para determinar a resposta em freqüência do condicionador de sinais desenvolvido no Laboratório de Qualidade de Energia do Departamento de Engenharia Elétrica. Nota-se que a resposta em freqüência do aparelho é

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

intimamente relacionada com o ganho do condicionador. A Figura 4.9(a) representa o ensaio no condicionador com ganho de 200 e a Figura 4.9(b) representa um ganho de 100. Para o ganho de 200, a resposta em freqüência não ultrapassa 100KHz enquanto que para o ganho de 100 a resposta em freqüência está ligeiramente acima de 200KHz. Significa que, se o fenômeno que for medido com esse condicionador tiver uma freqüência acima dos valores limites para cada ganho, certamente o sinal medido estará atenuado e comprometido. Este ensaio com o condicionador consagra então o ajuste do aparelho para o ensaio Charpy Instrumentado conforme a Norma ISO 14.556.

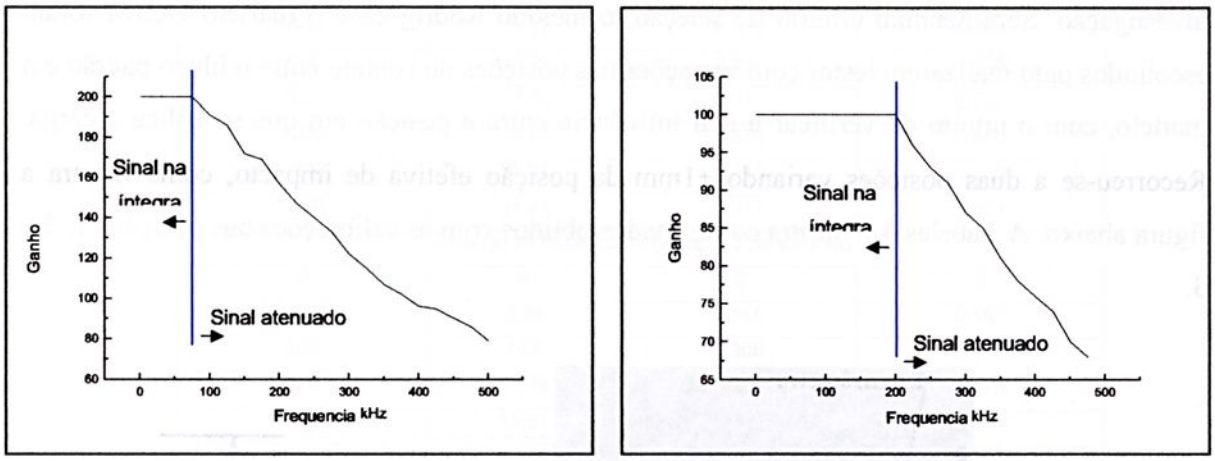


Figura 4.9 - (a) Curva Ganho vs Freqüência (kHz) para ganho de 200

(b) Curva Ganho vs Freqüência (kHz) para ganho de 100

Após ambos os martelos instrumentados realizaram–se duas metodologias de calibração estática em cada martelo. O propósito era avaliar se o método de calibração interferia na diferença percentual entre W_d e W_i. O ensaio de calibração estática foi efetuado conforme mencionado no item 3.3.2. As tabelas dos valores da calibração encontram-se no Anexo A.2. Abaixo seguem os valores médios e o desvio padrão das medidas. A principal proposta foi a de obter as curvas de calibração estática das células de carga para cada metodologia de calibração, 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 Condicionador de Sinais, pois é exatamente nesta saída, que o osciloscópio digital é conectado para capturar o sinal de força - tempo, medido no ensaio Charpy Instrumentado.

BCpIS - FEIS - UNESP

4.2.2 - CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO MARTELO GC3M PELO MÉTODO RODRIGUES COM VARIAÇÃO DA REGIÃO DE CONTATO ENTRE O BLOCO PADRÃO E O MARTELO

Nessa etapa de realização dos ensaios para calibração estática, aventou-se a possibilidade de que pequenas variações de posição na região de contato entre o bloco padrão e o martelo poderiam interferir de forma significativa na calibração estática. Para sanar tal questionamento e aprimorar a metodologia de calibração estática dos martelos resolveu-se dar curso a tal investigação. Sem nenhum critério de seleção, o método Rodrigues e o martelo GC3M foram escolhidos para realizarem testes com variações nas posições de contato entre o bloco padrão e o martelo, com o intuito de verificar a real influência entre a posição em que se aplica a carga. Recorreu-se a duas posições variando ±1mm da posição efetiva de impacto, como mostra a figura abaixo. A Tabelas 4.2 mostra os resultados obtidos com as calibrações nas posições 1, 2 e 3.

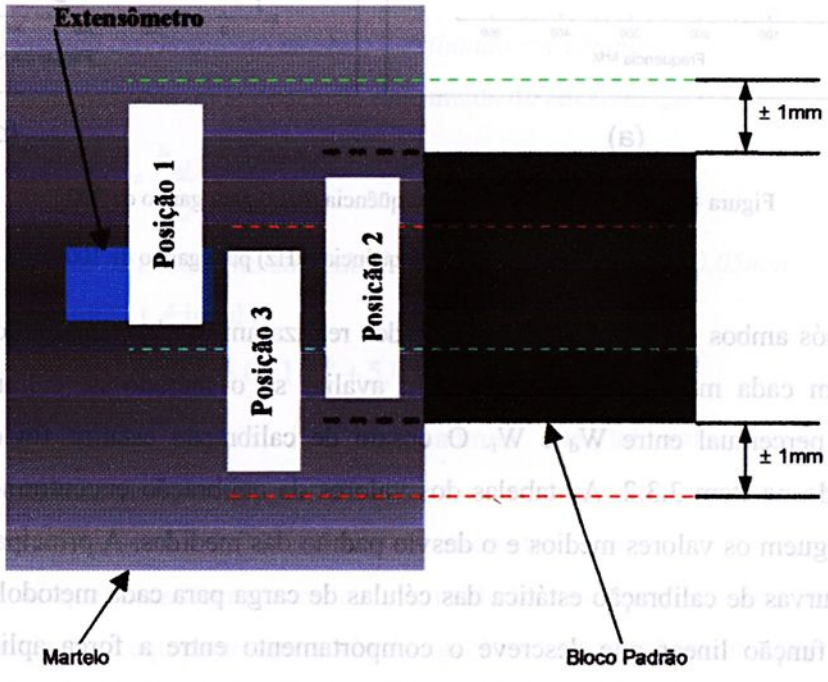


Figura 4.10 – Representação esquemática do critério utilizado para definir as posições 1, 2 e 3 no estudo realizado para averiguar a influência da região de contato do bloco padrão e do martelo na calibração estática.

Tabela 4.2 – Resultados da calibração estática do martelo GC3M para o Método Rodrigues com variação da região de contato entre o bloco padrão e o martelo.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Calibração Estática na posição 1 de contato			
0	0	0	0
200	3,98	0,152	0,141
400	7,96	0,314	0,300
600	11,93	0,476	0,461
800	15,91	0,642	0,625
1000	19,89	0,811	0,797
1200	23,86	0,978	0,965
1400	27,84	1,143	1,135
1600	31,82	1,311	1,311
Calibração Estática na posição 2 de contato			
0	0	0	0
200	3,98	0,148	0,153
400	7,96	0,306	0,316
600	11,93	0,461	0,475
800	15,91	0,618	0,634
1000	19,89	0,775	0,792
1200	23,86	0,928	0,945
1400	27,84	1,081	1,094
1600	31,82	1,231	1,231
Calibração Estática na posição 3 de contato			
0	0	0	0
200	3,98	0,144	0,148
400	7,96	0,298	0,303
600	11,93	0,443	0,455
800	15,91	0,585	0,602
1000	19,89	0,727	0,746
1200	23,86	0,869	0,888
1400	27,84	1,011	1,024
1600	31,82	1,147	1,147

Observa-se que as variações aumentam com o nível de carregamento. Por exemplo, para um carregamento de 31,82KN, tomando como base a posição 3 em relação a 1, nota-se uma diferença de 14%. Este fato deixa claro que a calibração é muito dependente da região de contato bloco padrão/martelo. Portanto, é necessário muita atenção ao posicionar corretamente o bloco padrão na região de impacto no martelo, pois pode haver um comprometimento nos valores de força medidos.

4.2.3 - CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO MARTELO ISO.

4.2.3.1 – Método Rodrigues de Calibração.

Tabela 4.3 – Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo ISO para o Método Rodrigues.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Média dos Ensaios			
0	0	0 (0,0)	0 (0,0)
200	3,98	0,083 (0,003)	0,078 (0,008)
400	7,96	0,170 (0,005)	0,165 (0,008)
600	11,93	0,253 (0,007)	0,249 (0,008)
800	15,91	0,332 (0,009)	0,331 (0,008)
1000	19,89	0,407 (0,011)	0,408 (0,007)
1200	23,86	0,483 (0,009)	0,482 (0,007)
1400	27,84	0,552 (0,008)	0,555 (0,007)
1600	31,82	0,623 (0,007)	0,623 (0,007)

( ) Desvio Padrão

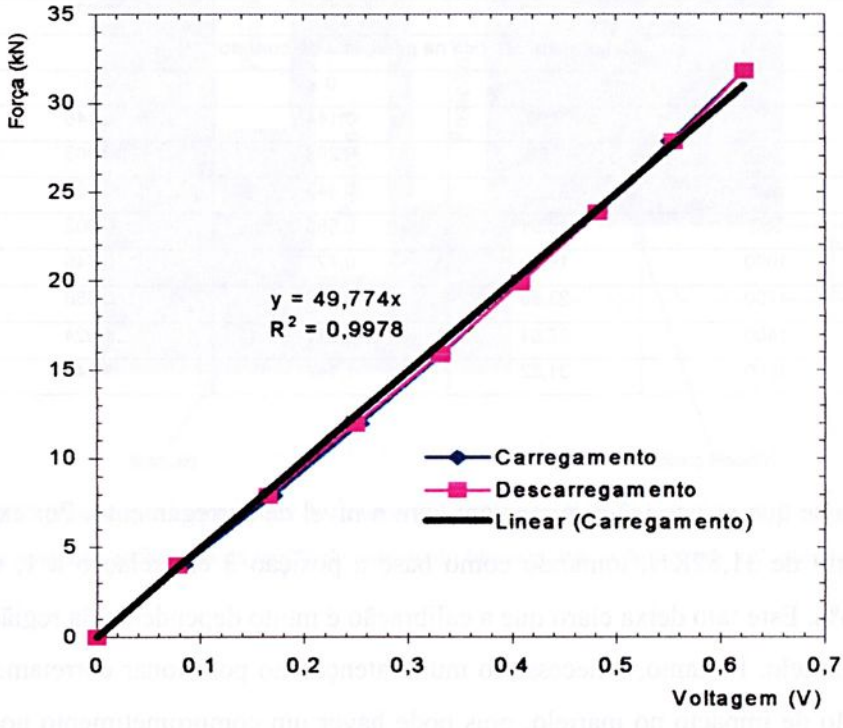


Figura 4.11 - Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo ISO para o Método Rodrigues de Calibração.

Portanto, em vista dos resultados obtidos conclui-se que a célula de carga apresenta boa repetibilidade, fato esse verificado pela figura acima, com base no coeficiente de linearidade R^2=0,9978.

Assim, conforme ilustra a Figura 4.11, a função linear que relaciona o nível de tensão captado pelo voltímetro digital e a força aplicada é dada pela expressão abaixo, que se denomina *equação de calibração estática da célula de carga.*

$$F = 49{,}774.V \qquad (4.2)$$

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

4.2.3.2 – Método Vidotto de Calibração.

Tabela 4.4 - Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo ISO para o Método Vidotto de Calibração.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Média dos Ensaios			
0	0	0 (0,0)	0 (0,0)
200	3,98	0,071 (0,004)	0,065 (0,004)
400	7,96	0,147 (0,005)	0,140 (0,004)
600	11,93	0,225 (0,004)	0,214 (0,004)
800	15,91	0,303 (0,004)	0,291 (0,004)
1000	19,89	0,382 (0,002)	0,368 (0,004)
1200	23,86	0,459 (0,003)	0,443 (0,004)
1400	27,84	0,534 (0,004)	0,519 (0,005)
1600	31,82	0,609 (0,005)	0,609 (0,005)

( ) Desvio Padrão

Assim, conforme ilustra a Figura 4.12, a função linear que relaciona o nível de tensão captado pelo voltímetro e a força aplicada é dada pela expressão abaixo, que se denomina *equação de calibração da célula de carga.*

$$F = 52{,}256.V \qquad (4.3)$$

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

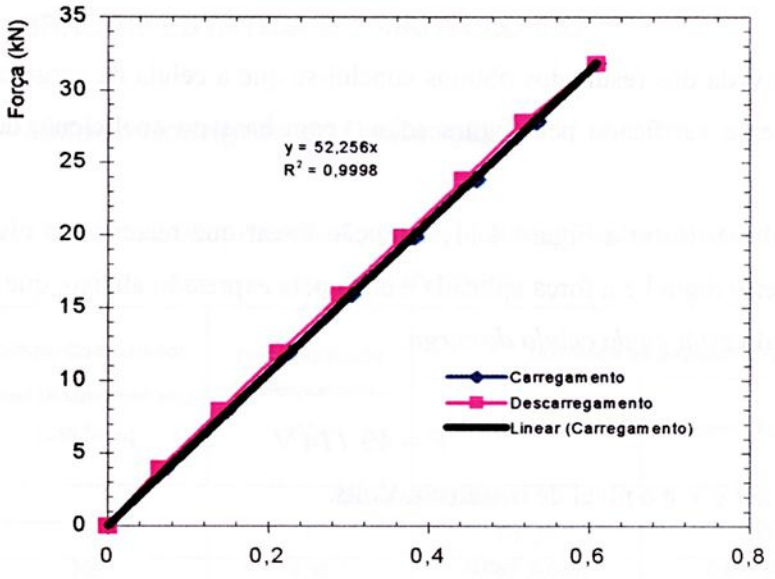


Figura 4.12 - Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo ISO para o Método Vidotto de Calibração.

4.2.4 - CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO MARTELO GC3M.

4.2.4.1 – Método Rodrigues de Calibração.

Tabela 4.5 – Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de Calibração.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Média dos Ensaios			
0	0	0 (0,0)	0 (0,0)
200	3,98	0,158 (0,005)	0,151 (0,004)
400	7,96	0,325 (0,005)	0,316 (0,004)
600	11,93	0,489 (0,006)	0,484 (0,001)
800	15,91	0,658 (0,007)	0,647 (0,009)
1000	19,89	0,825 (0,004)	0,816 (0,011)
1200	23,86	0,988 (0,003)	0,983 (0,011)
1400	27,84	1,152 (0,004)	1,151 (0,010)
1600	31,82	1,317 (0,004)	1,317 (0,004)

( ) Desvio Padrão

Portanto, em vista dos resultados obtidos conclui-se que a célula de carga apresenta boa repetibilidade, fato esse verificado pela figura acima, com base no coeficiente de linearidade R^2=0,9999.

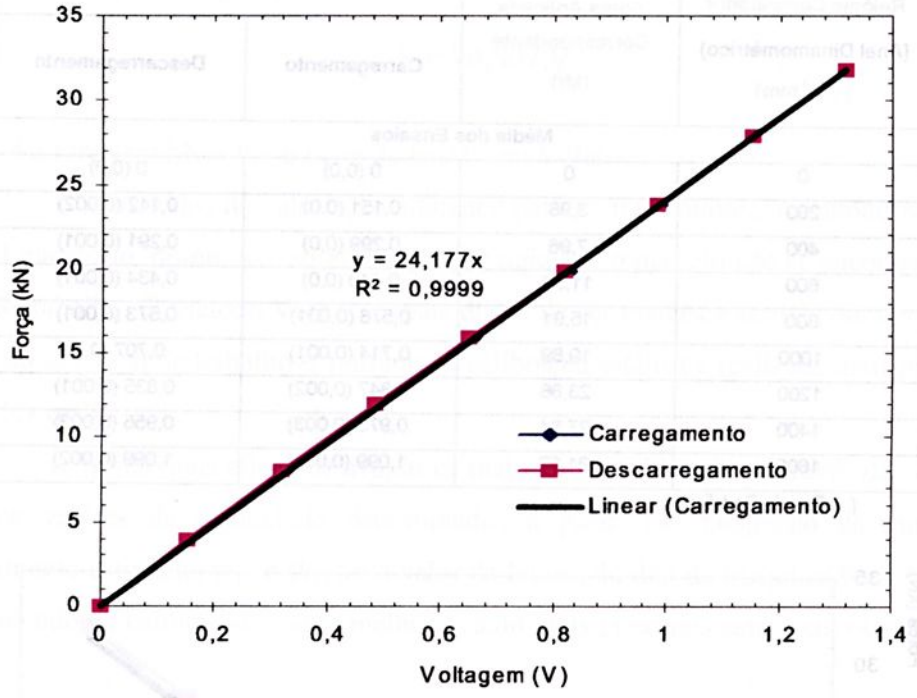


Figura 4.13 - Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de Calibração.

Assim, conforme ilustra a Figura 4.13, a função linear que relaciona o nível de tensão captado pelo voltímetro digital e a força aplicada é dada pela expressão abaixo, que se denomina *equação de calibração estática da célula de carga.*

$$F = 24{,}177.V \qquad (4.4)$$

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

4.2.4.2 – Método Vidotto de Calibração.

Tabela 4.6 – Média e Desvio Padrão dos valores da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Vidotto de Calibração.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Média dos Ensaios			
0	0	0 (0,0)	0 (0,0)
200	3,98	0,151 (0,0)	0,142 (0,002)
400	7,96	0,299 (0,0)	0,291 (0,001)
600	11,93	0,440 (0,0)	0,434 (0,001)
800	15,91	0,578 (0,001)	0,573 (0,001)
1000	19,89	0,714 (0,001)	0,707 (0,0)
1200	23,86	0,847 (0,002)	0,835 (0,001)
1400	27,84	0,975 (0,003)	0,955 (0,003)
1600	31,82	1,099 (0,002)	1,099 (0,002)

( ) Desvio Padrão

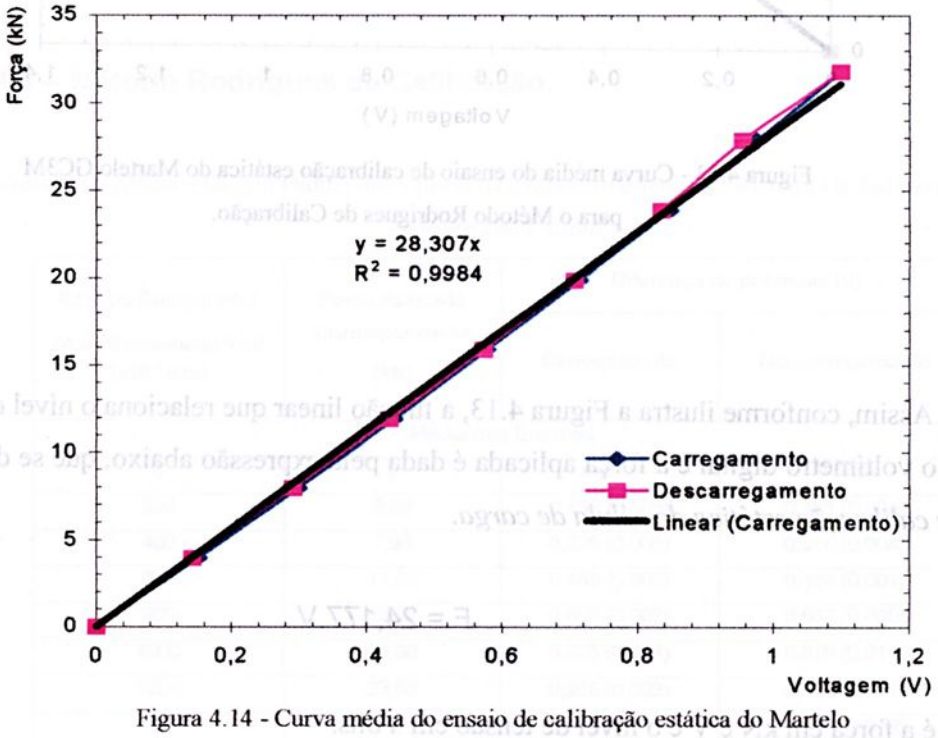


Figura 4.14 - Curva média do ensaio de calibração estática do Martelo GC3M para o Método Vidotto de Calibração.

Portanto, em vista dos resultados obtidos, conclui-se que a célula de carga apresenta boa repetibilidade, fato este verificado pela figura acima, com base no coeficiente de linearidade R^2=0,9984.

Assim, conforme ilustra a Figura 4.14, a função linear que relaciona o nível de tensão captado pelo voltímetro digital e a força aplicada é dada pela expressão abaixo, que se denomina *equação de calibração estática da célula de carga.*

$$F = 28{,}307.V \qquad (4.5)$$

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

Dos métodos de calibração adotados para os transdutores, o método Rodrigues é de fácil manuseio, porém, ele apresenta menor rigidez e o martelo não se encontra fixado no local de trabalho. O Método Vidotto é mais difícil de ser manuseado, todavia, o martelo está fixado no seu local de trabalho e, portanto, a calibração estática é realizada mais próxima das condições reais.

A forma mais eficaz de avaliar os métodos de calibração é através da comparação entre os valores de tenacidade determinados a partir da integração da curva força-deslocamento estimado(W_{iR} e W_{iV}) e o valor da leitura do dial da máquina(W_d). Assumiu-se que o método de calibração é tanto melhor quanto mais próximos estiverem os valores $W_{i_}$ e W_d.

Em relação às configurações dos martelos, já descritas anteriormente, a finalidade era otimizar a sensibilidade do transdutor ao carregamento de impacto. Foi possível notar que o martelo GC3M apresentou uma sensibilidade bem maior que o martelo ISO, fato este comprovado pelos fatores de calibração estática, adotando o método de calibração Vidotto. O fator para o martelo GC3M foi 84,6% maior que o martelo ISO, o que significa que o martelo GC3M tem quase o dobro de sensibilidade que o proposto pela norma ISO. Apesar do martelo com a configuração GC3M ter sido o mais sensível, o que apresentou melhores resultados foi o de configuração ISO, pois quase que na totalidade dos ensaios realizados, esse martelo satisfez as condições estabelecidas pela norma ISO 14.556. Após determinado os coeficientes de calibração para cada martelo, realizaram-se os ensaios nos corpos-de-prova.

4.2.5 - ENSAIO CHARPY INSTRUMENTADO À TEMPERATURA AMBIENTE (~298K)

A figura a seguir representa o primeiro ensaio realizado. O processo de fratura do corpo-de-prova ocorreu nos primeiros 0,5ms do sinal capturado. O osciloscópio, neste ensaio, foi

setado para capturar o sinal no tempo total de 2,5ms e a discretização em 2500 pontos. Nota-se, que o momento do impacto no sinal não foi discretizado em 2500 pontos, prejudicando a quantidade de informações durante o impacto. O principal motivo deste fato foi a falta de conhecimento do processo de fratura do aço ABNT 4140. O outro ponto observado neste ensaio preliminar foi o nível de ruído muito acentuado no sinal. Decidiu-se então, que os equipamentos da cadeia de medição fossem verificados quanto aos aterramentos e por conseqüência, o nível diminui consideravelmente na análise dos próximos ensaios.

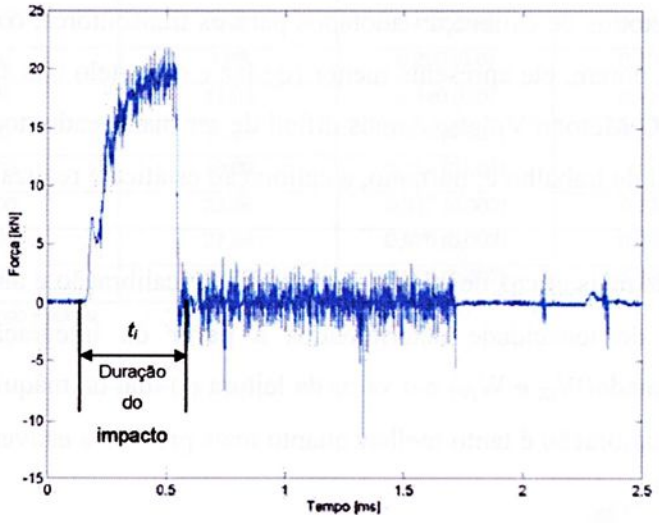


Figura 4.15 - Sinal de força - tempo capturado em uma base de tempo do osciloscópio de 2,5ms.

Após este ensaio preliminar, adotou-se que a captura do sinal no osciloscópio seria feita num tempo total de 0,5ms, desta forma o sinal no momento do impacto seria discretizado em 2500 pontos.

Uma vez executadas todas as etapas preliminares e necessárias à consolidação do ensaio Charpy Instrumentado, foi possível, enfim, realizar o ensaio, de maneira preliminar, com o aço ABNT 4140. Foram ensaiados 3 amostras em cada martelo. Serão apresentados neste ítem apenas o ensaio cujo corpo-de-prova apresentou 30 Joules de tenacidade comum nos dois martelos, os demais ensaios estão no Anexo A.3. Em todos os ensaios, as curvas tiveram o mesmo comportamento da curva. As curvas apresentadas a seguir representam o ensaio considerando o fator de calibração do Método Rodrigues de calibração, para cada martelo. A Figura 4.16(a) apresenta o sinal de força em função do tempo do aço 4140, ensaiado com o martelo ISO, com 30 Joules de energia absorvida lida na máquina. A Figura 4.16(b) ilustra a curva força em função do deslocamento estimado. Já na Figura 4.16(c) tem-se a curva força -

tempo e Tenacidade em função do tempo, e finalmente na Figura 4.16(d) a curva força - deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento.

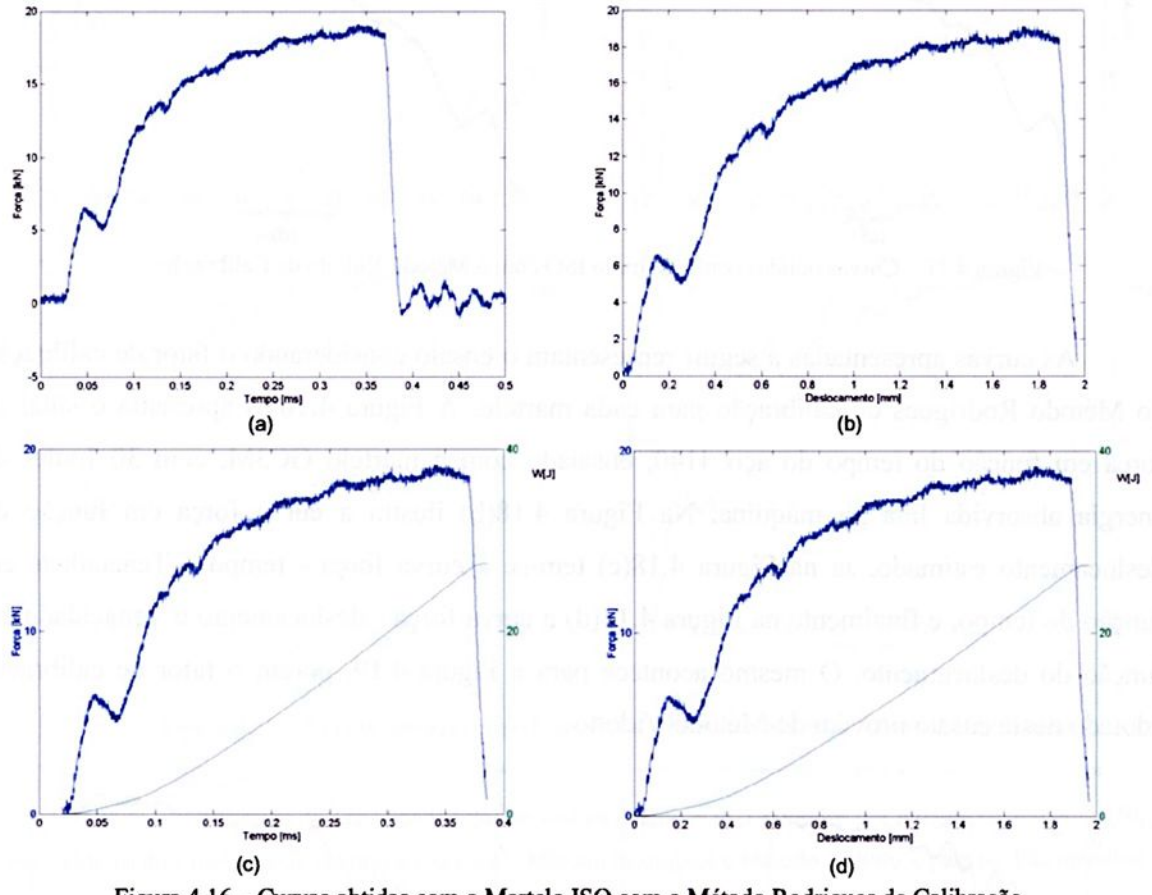
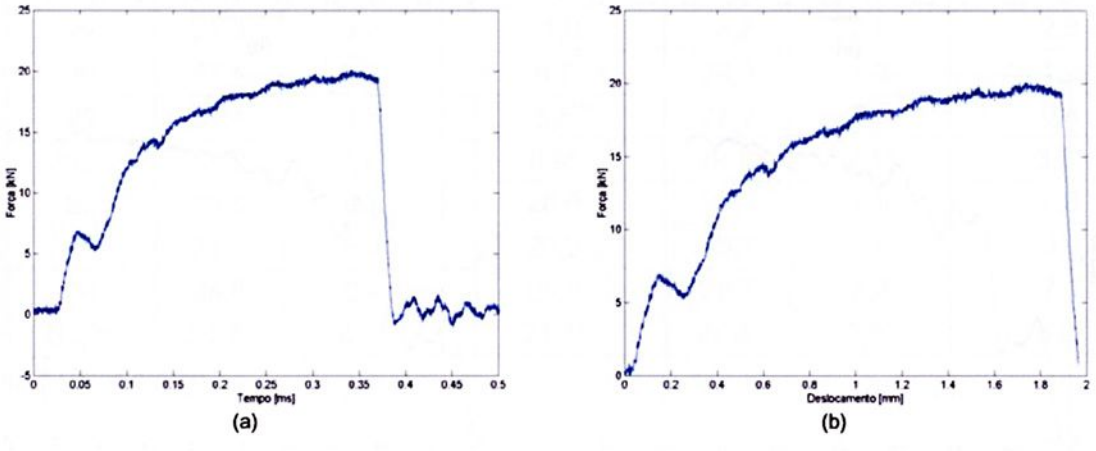


Figura 4.16 – Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Rodrigues de Calibração.

O mesmo acontece para a Figura 4.17, porém o fator de calibração adotado neste ensaio provém do Método Vidotto de calibração.



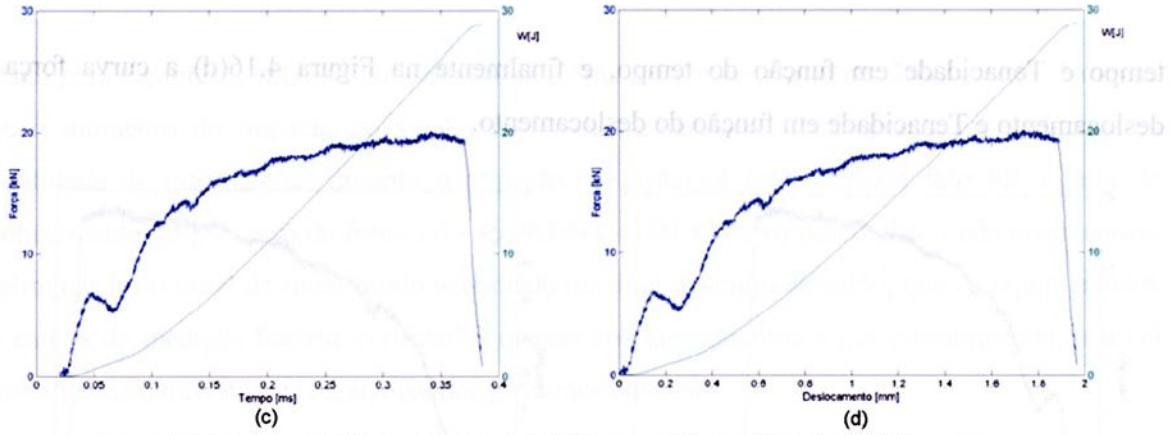


Figura 4.17 – Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Vidotto de Calibração.

As curvas apresentadas a seguir representam o ensaio considerando o fator de calibração do Método Rodrigues de calibração para cada martelo. A Figura 4.18(a) apresenta o sinal de força em função do tempo do aço 4140, ensaiado com o martelo GC3M, com 30 Joules de energia absorvida lida na máquina. Na Figura 4.18(b) ilustra a curva força em função do deslocamento estimado. Já na Figura 4.18(c) tem-se a curva força - tempo e Tenacidade em função do tempo, e finalmente na Figura 4.18(d) a curva força - deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento. O mesmo acontece para a Figura 4.19, porém o fator de calibração adotado neste ensaio provém do Método Vidotto.

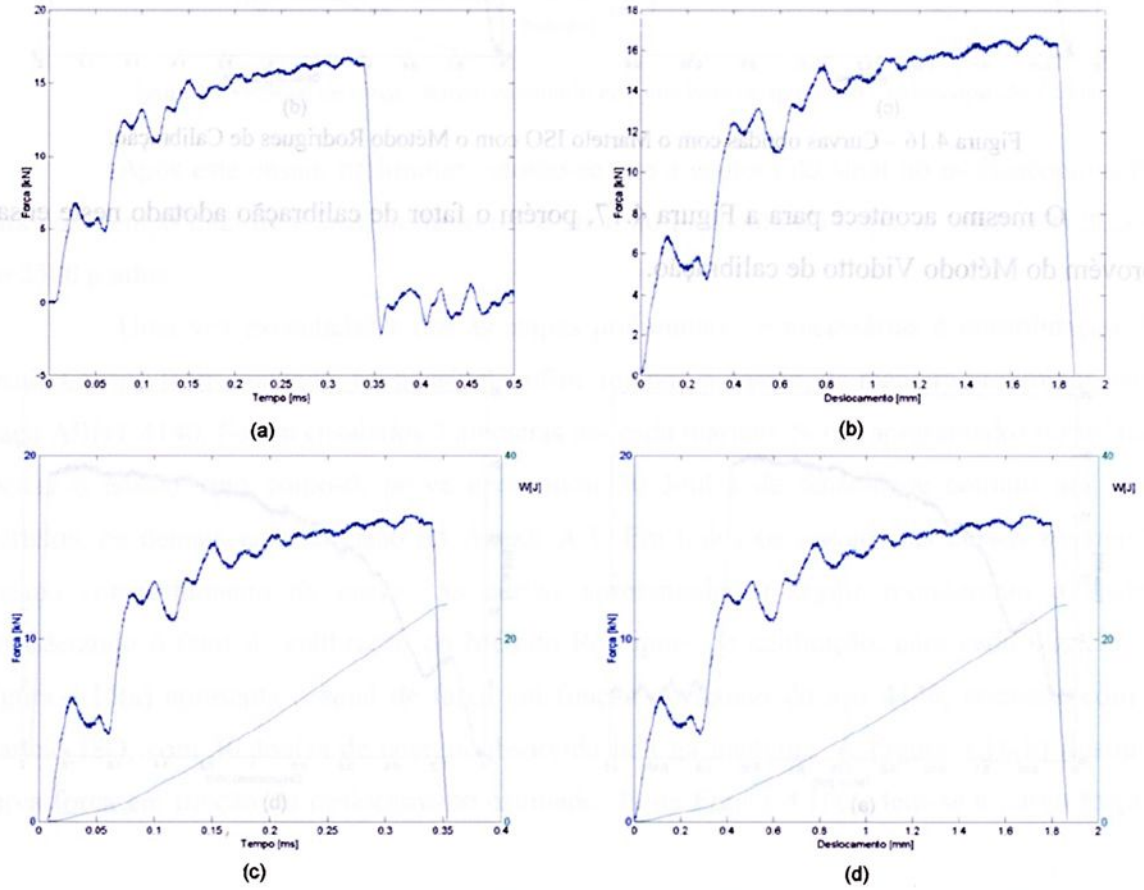


Figura 4.18 – Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Rodrigues de Calibração.

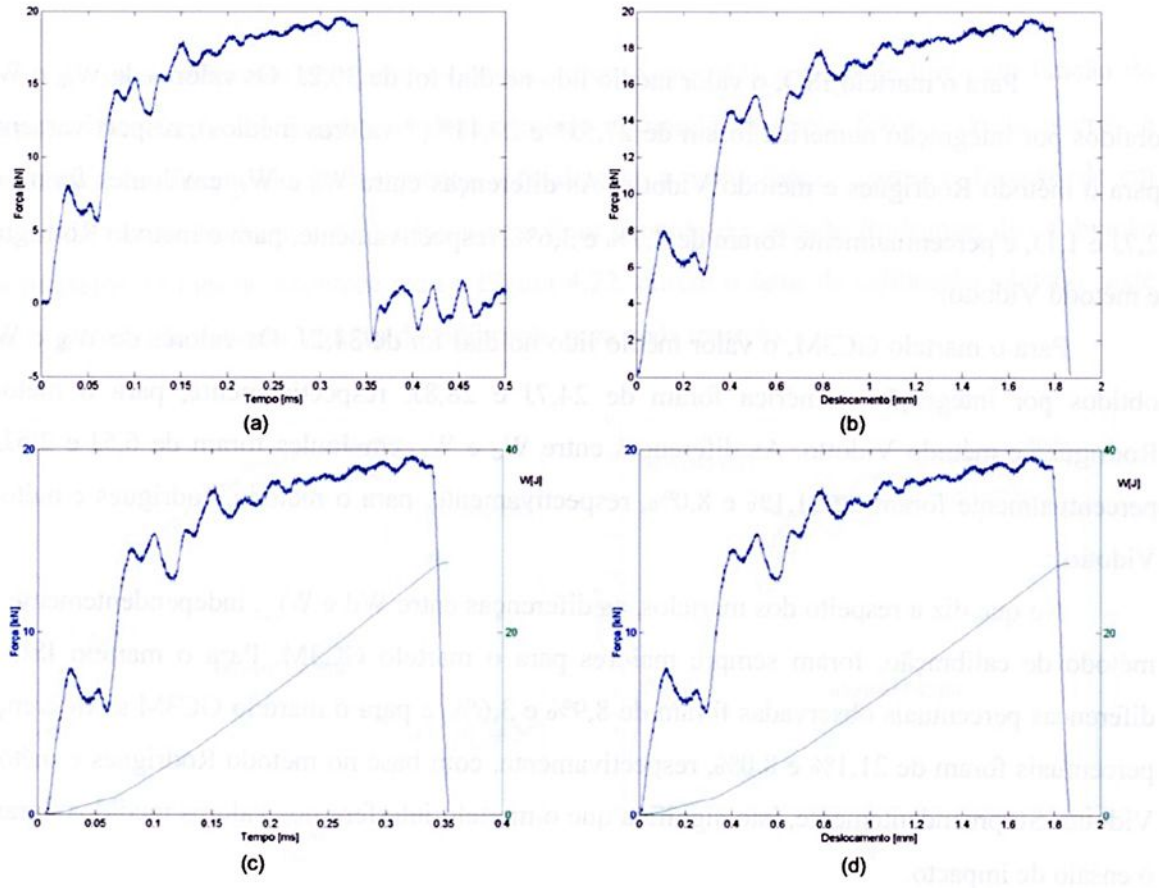


Figura 4.19 – Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Vidotto de Calibração.

Tabela 4.7 – Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(W_d) e obtidos por integração numérica (W_{i-}), observando os dois métodos de calibração estática – Método Rodrigues e Método Vidotto -, para os dois martelos - Martelo ISO e Martelo GC3M.

	W_d [Joules]	Método Rodrigues			Método Vidotto		
		W_{IR} [Joules]	$(W_d - W_{IR})$ [Joules]	$(W_d - W_{IR})/W_{IR}$ [%]	W_{IV} [Joules]	$(W_d - W_{IV})$ [Joules]	$(W_d - W_{IV})/W_{IV}$ [%]
Martelo ISO	33	29,5	3,5	10,6	31,1	1,9	5,8
	29	25,8	3,2	11,0	28,2	2,8	2,8
	30	27,4	2,6	8,7	28,8	1,2	1,2
	29	27,4	1,6	5,5	28,2	0,8	0,8
	30,2*	27,5*	2,7*	8,9*	29,1*	2,1*	3,6*
Martelo GC3M	32	25,3	6,7	20,9	29,5	2,5	7,8
	31	24,1	6,9	22,3	28,2	2,8	9,0
	30	24,6	6,4	20,6	28,7	2,3	7,4
	31,3*	24,7*	6,6*	21,1*	28,8*	2,5*	8,0*

*Obs.: * Valor médio*

Para o martelo ISO, o valor médio lido no dial foi de 30,2J. Os valores de W_{iR} e W_{iV} obtidos por integração numérica foram de 27,5J* e 29,1J* (* valores médios), respectivamente, para o método Rodrigues e método Vidotto. As diferenças entre W_d e $W_{i_}$ em Joules foram de 2,7J e 1,1J, e percentualmente foram de 8,9% e 3,6%, respectivamente, para o método Rodrigues e método Vidotto.

Para o martelo GC3M, o valor médio lido no dial foi de 31,2J. Os valores de W_{iR} e W_{iV} obtidos por integração numérica foram de 24,7J e 28,8J, respectivamente, para o método Rodrigues e método Vidotto. As diferenças entre W_d e $W_{i_}$ em Joules foram de 6,5J e 2,5J, e percentualmente foram de 21,1% e 8,0%, respectivamente, para o método Rodrigues e método Vidotto.

No que diz a respeito dos martelos, as diferenças entre Wd e Wi_, independentemente do método de calibração, foram sempre maiores para o martelo GC3M. Para o martelo ISO as diferenças percentuais observadas foram de 8,9% e 3,6%, e para o martelo GC3M as diferenças percentuais foram de 21,1% e 8,0%, respectivamente, com base no método Rodrigues e método Vidotto. Surpreendentemente, isto significa que o martelo interfere nos valores medidos durante o ensaio de impacto.

O método de calibração adotado é outro parâmetro significativo na obtenção da curva força-tempo no ensaio Charpy Instrumentado. Quanto mais próximas as condições de calibração estática do martelo estiverem das condições em que o martelo é solicitado no impacto, condições de deformação elástica, menores foram as diferenças percentuais. Na análise dos resultados do martelo ISO nota-se este fato.

Para efeito de comparação, a Figura 4.20 apresenta curvas força - tempo considerando ambos os métodos de calibração para cada martelo. No ensaio de cada martelo a energia lida no dial foi de 30 Joules

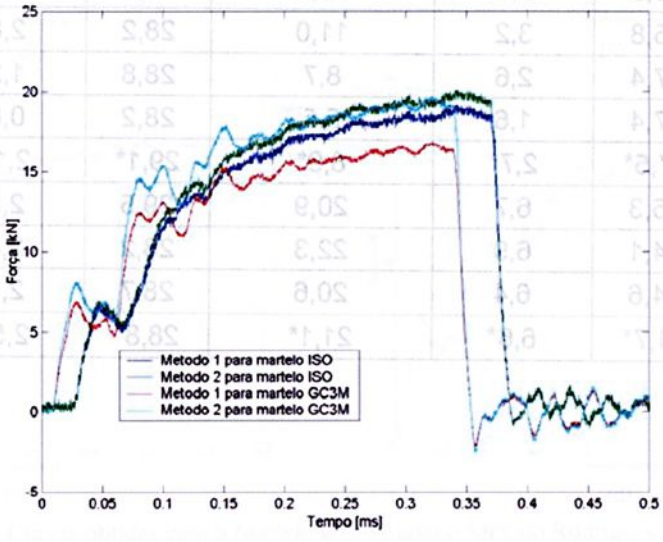


Figura 4.20 – Curvas obtidas com ambos os martelos adotando os dois métodos de Calibração.

Torna-se relevante comparar as curvas força - apresenta o sinal de força em função do tempo, curva força em função do deslocamento estimado, a curva força - deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento, e finalmente a curva força - tempo e Tenacidade em função do tempo. Na Figura 4.21 adotou-se o fator provido do método Rodrigues de calibração dos martelos. O mesmo acontece para a Figura 4.22, porém o fator de calibração adotado neste ensaio provém do método Vidotto de calibração para cada martelo.

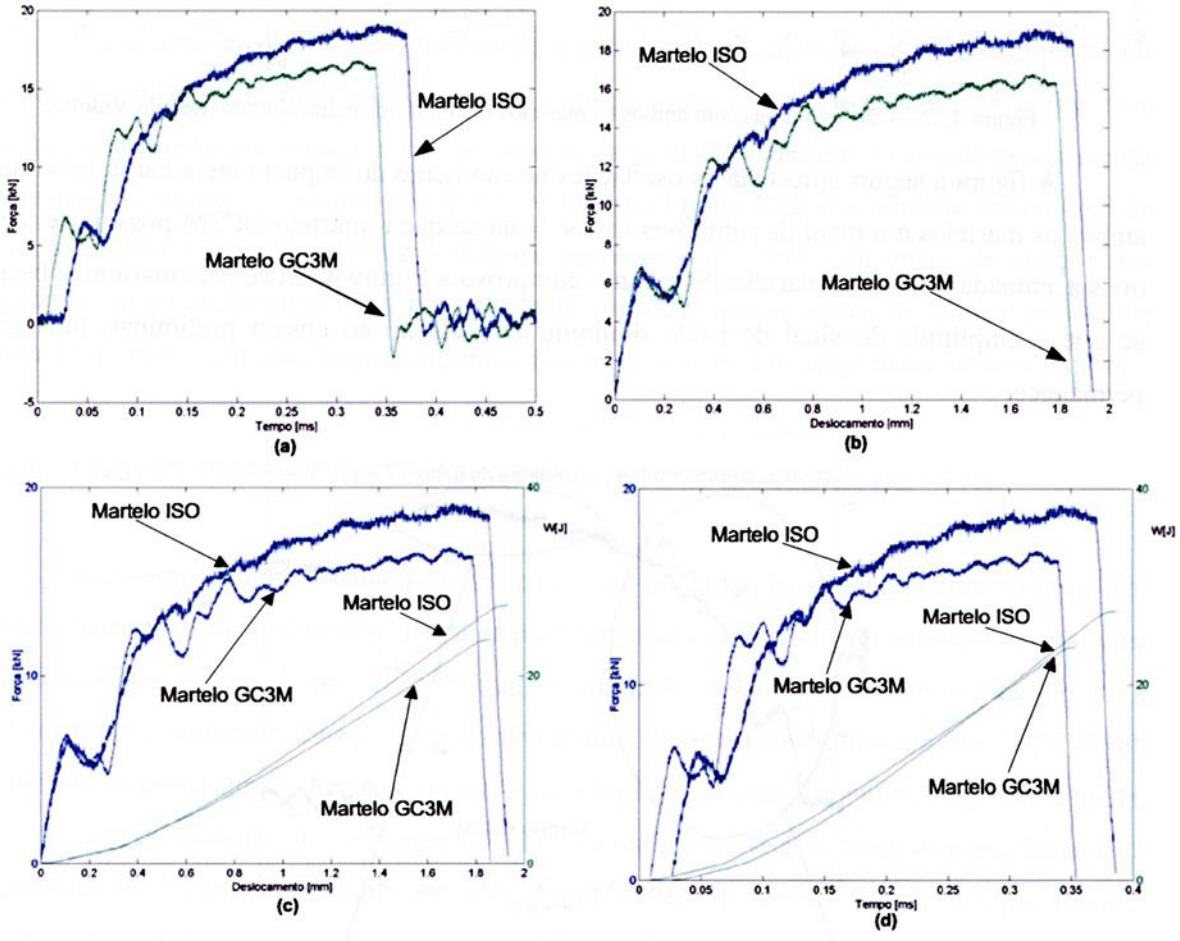
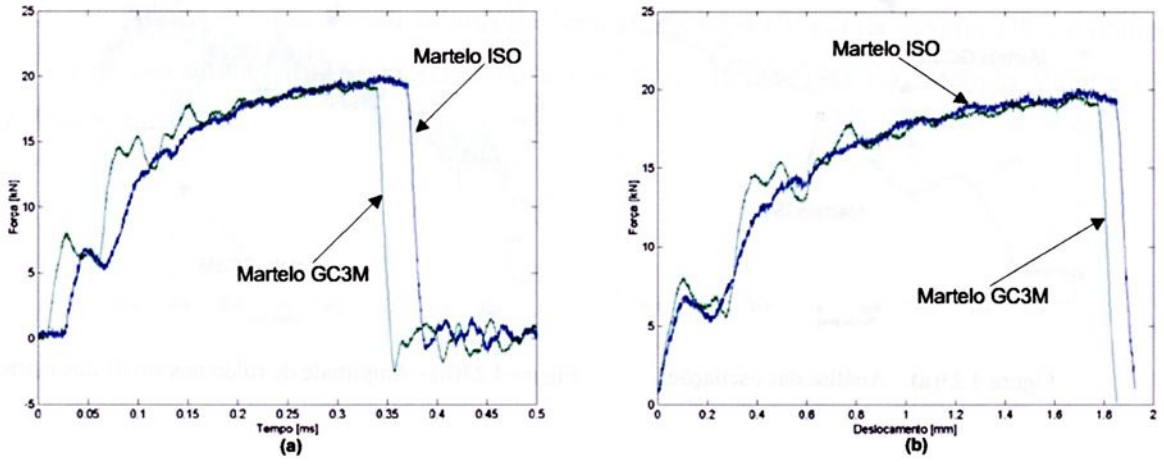


Figura 4.21 – Curvas obtidas com ambos os martelos com fator de calibração do Método Rodrigues.



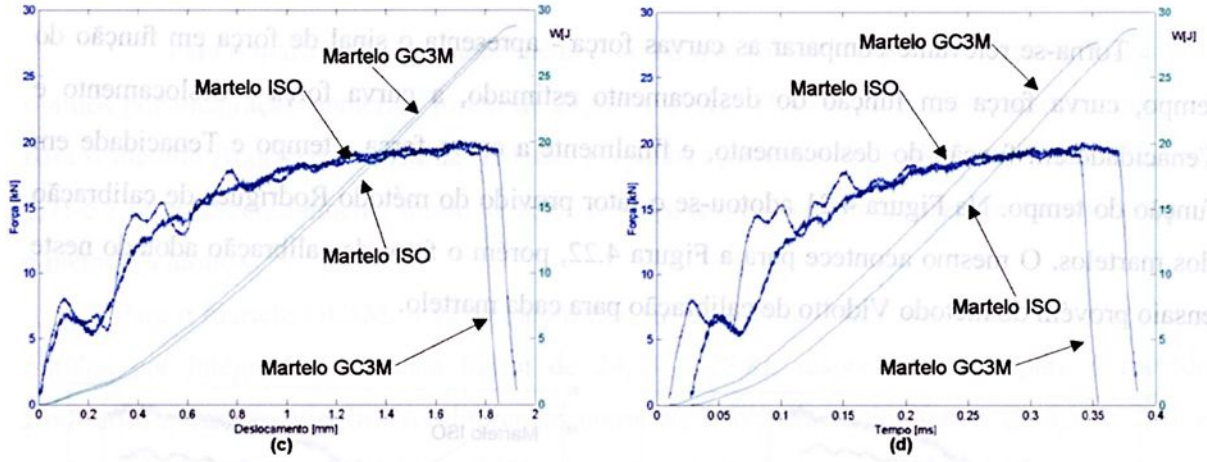


Figura 4.22 – Curvas obtidas com ambos os martelos com fator de calibração do Método Vidotto.

A figura a seguir apresenta as oscilações no momento do impacto até a carga máxima de ambos os martelos e o nível de ruído nos sinais. Nota-se que o martelo GC3M possui oscilações mais acentuadas do que o martelo ISO, como comprova a Figura 4.23(a). Nos martelos observa-se que a amplitude do sinal de ruído diminuiu em relação ao ensaio preliminar, mas ainda permanece.

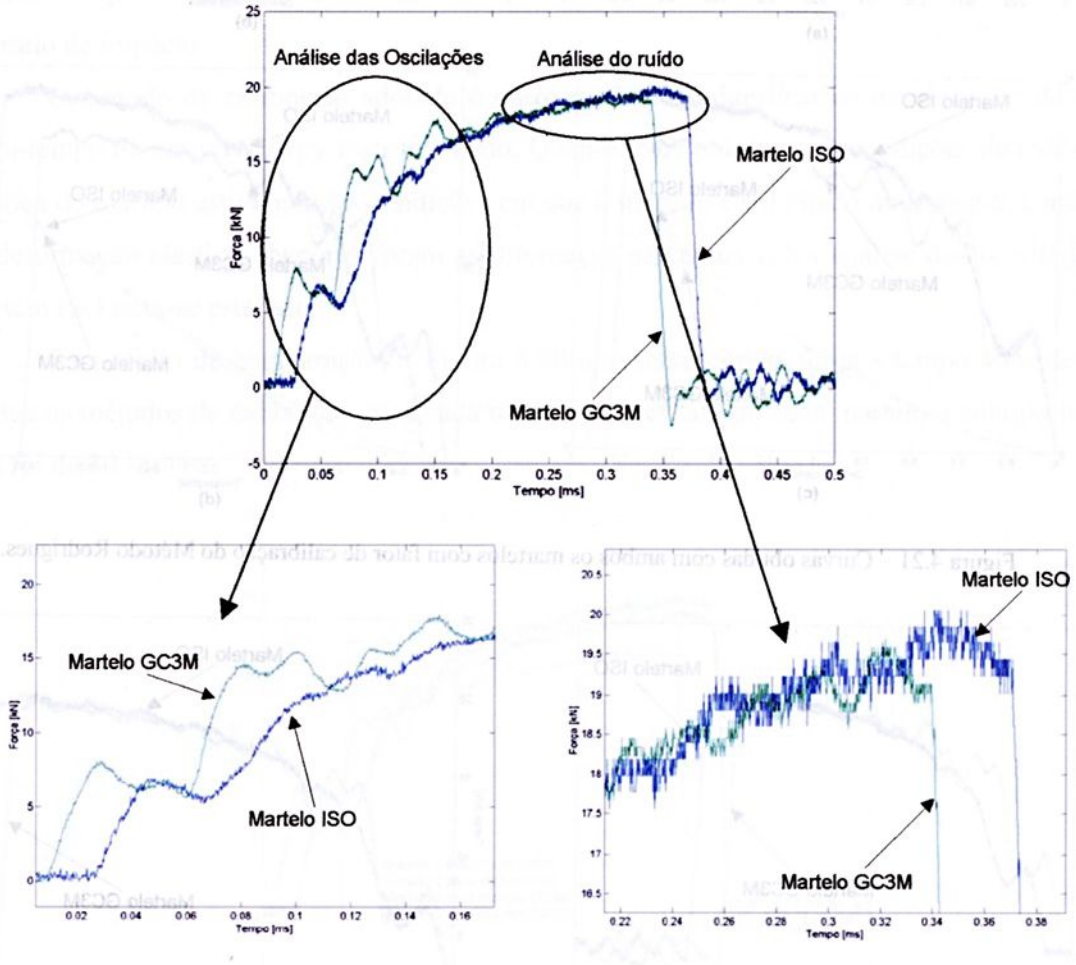


Figura 4.23(a) – Análise das oscilações.

Figura 4.23(b) - Amplitude de ruído nos sinais dos martelos.

As oscilações mais acentuadas no martelo GC3M são atribuídas às ondas de choque que excitaram os extensômetros varias vezes durante o processo de fratura. Estas ondas ainda podem estar excitando freqüências naturais do martelo e, em ressonância resultam em amplitudes maiores, causando leituras errôneas nos extensômetros. Uma forma de minimizar as ondulações é através do aumento de rigidez do martelo, mas por outro lado, ao aumentar a rigidez, o martelo perde em sensibilidade.

O aumento da sensibilidade do martelo a cadeia de medição torna-se mais susceptível aos efeitos de ondas de choque proveniente do impacto entre o martelo e corpo de prova. Este acontecimento está relacionado com a diminuição da rigidez do transdutor causada pela presença do diafragma no interior do martelo GC3M. Nota-se na Figura 4.23(a) as ondulações no sinal do martelo GC3M no tempo de 0,02 a 0,16ms, certamente decorridas de ondas de choque que excitaram os extensômetros. Não obstante, vale ressaltar, que as ondas de choque podem ter excitado o martelo em suas freqüências naturais e na ressonância as amplitudes foram alteradas.

4.2.6 - ENSAIO CHARPY INSTRUMENTADO A TEMPERATURA DE ~77K

Nesta etapa foram ensaiados quatro corpos-de-prova em baixa temperatura. O propósito nesta ocasião foi o de avaliar se a cadeia de medição estava favorável para condições de extrema fragilidade dos corpos-de-prova. O transdutor utilizado nestes ensaios foi o Martelo ISO, considerando o fator de calibração provido do Método Vidotto. Construídos em aço ABNT 4140, os corpos-de-prova foram imersos em nitrogênio liquido durante 3 minutos. Logo em seguida, uma pinça apropriada foi utilizada para posicionar a réplica na base da máquina e imediatamente o pêndulo foi liberado. As figuras a seguir representam as curvas força – tempo, força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J] para cada réplica.

Na Tabela 4.7 apresentam valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(W_d) e obtida por integração numérica (W_i), observando o apenas o Martelo ISO e o Método Vidotto da calibração estática.

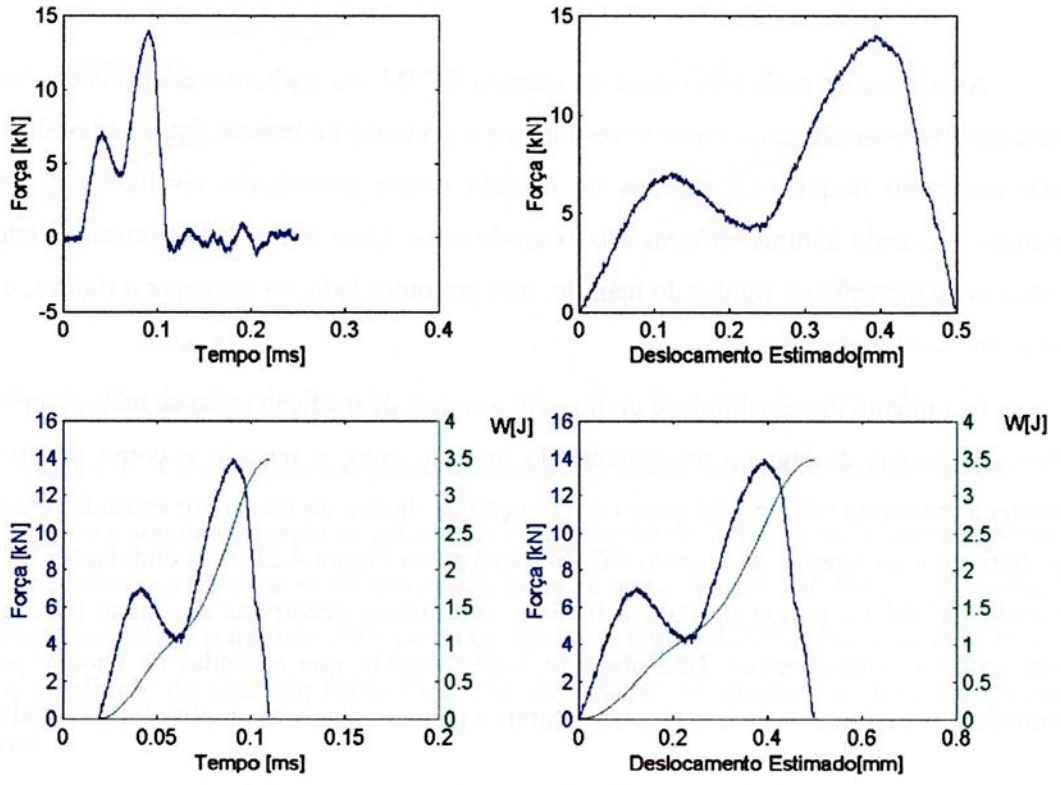


Figura 4.24 – Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com W_d=4,5J.

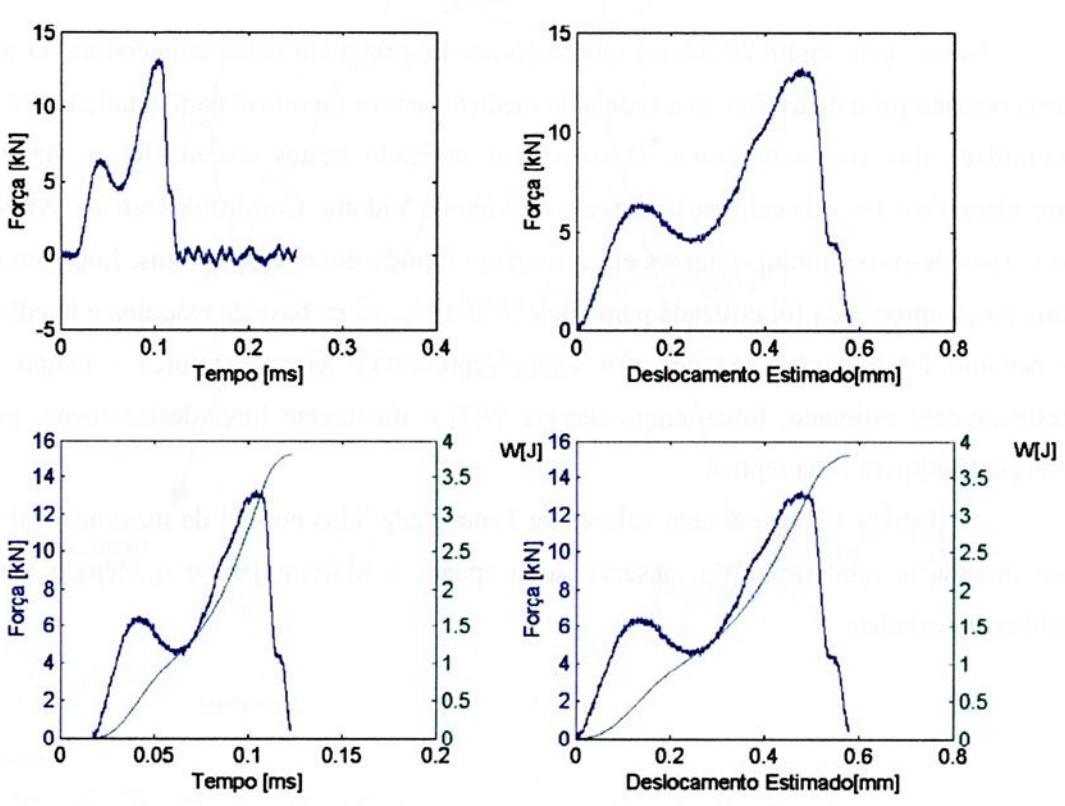


Figura 4.25 – Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com W_d=5,0J.

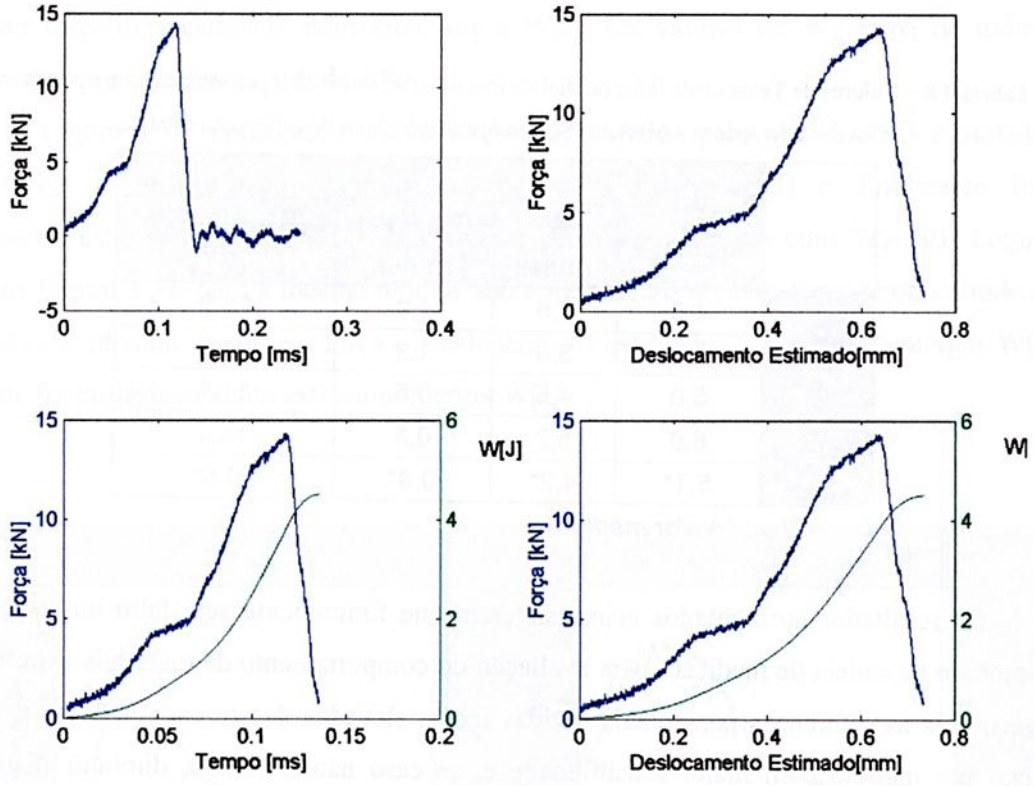


Figura 4.26 – Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com W_d=5,0J.

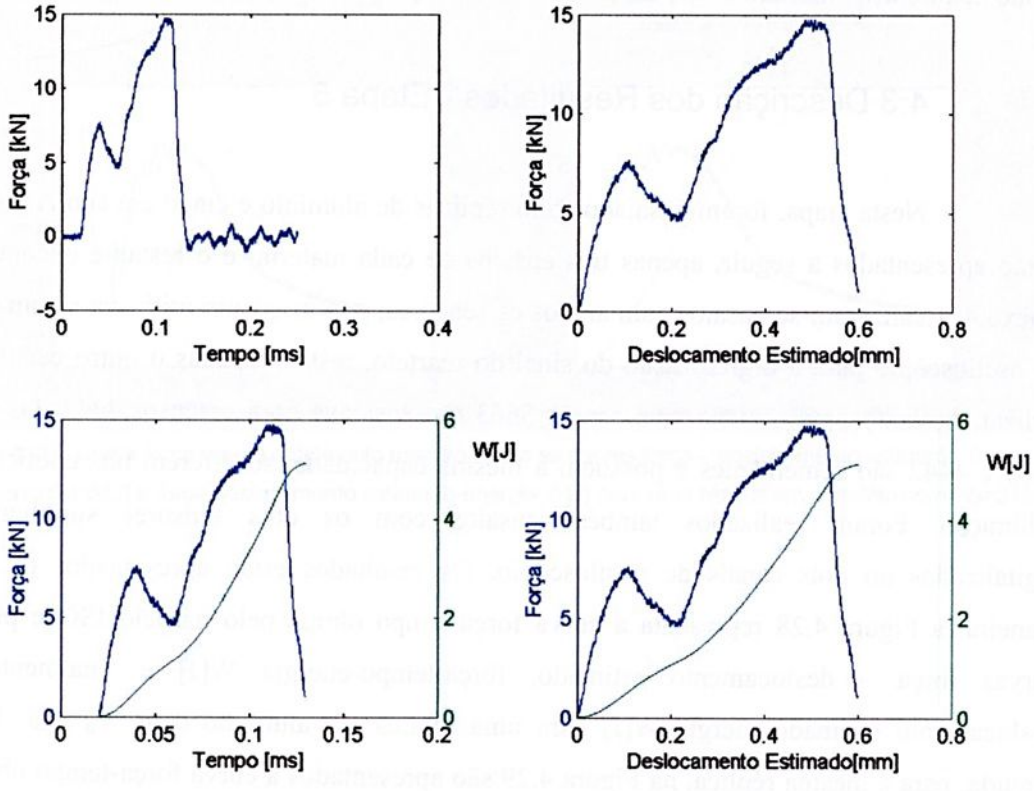


Figura 4.27 – Curvas da réplica ensaiada em temperatura de 77K com W_d=6,0J.

Tabela 4.8 – Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(W_d) e obtidos por integração numérica (W_i), observando apenas o Martelo ISO e o Método Vidotto de calibração estática.

	W_d [Joules]	W_i [Joules]	$(W_d - W_i)$ [Joules]	$(W_d - W_i)/W_i$ [%]
Martelo ISO	4,5	3,5	1,0	28,6
	5,0	3,8	1,2	31,6
	5,0	4,5	0,5	11,1
	6,0	5,2	0,8	15,4
	5,1*	4,2*	0,8*	21,6*

*Obs.: * Valor médio*

Os resultados apresentados acima sugerem que futuramente seja feito um estudo mais aprimorado na cadeia de medição, para avaliação do comportamento de materiais extremamente frágeis, pois as diferenças percentuais obtidas foram elevadas. Neste caso pode se pensar em utilizar um martelo com maior sensibilidade e, se caso não satisfizer, diminuir o ganho do condicionador, automaticamente a resposta em freqüência aumenta, pois neste tipo de ensaio o tempo de interação martelo-corpo-de-prova é muito rápido.

4.3 Descrição dos Resultados - Etapa 3

Nesta etapa, foram ensaiados oito réplicas de alumínio e cinco em aço ABNT 1040. Serão apresentados a seguir, apenas três ensaios de cada material e o restante encontra-se no Anexo 4. Realizaram-se ensaios com ambos os sensores, porém quanto utilizava-se um canal 01 do osciloscópio para a digitalização do sinal do martelo, restava apenas o outro canal 02 para utilizar, portanto ora ensaiava com sensor 3663 ora ensaiava com o sensor 4442. Os sensores 3663 e 4442 são semelhantes e possuem a mesma capacidade, só diferem nos coeficientes de calibração. Foram realizados também ensaios com os dois sensores simultaneamente digitalizados no dois canais do osciloscópio. Os resultados estão apresentados da seguinte maneira: a Figura 4.28 representa a curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e plotada as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=21J. Logo em seguida, para a mesma réplica, na Figura 4.29 são apresentados a curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e plotada as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e

finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J]. Os valores de W_d e W_i de todos os ensaios estão apresentados na Tabela 4.9.

Figura 4.30 representa a curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e plotada as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J] para outra réplica em alumínio com W_d=20J. Logo em seguida na Figura 4.31, para a mesma réplica, são apresentados a curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e plotada as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J].

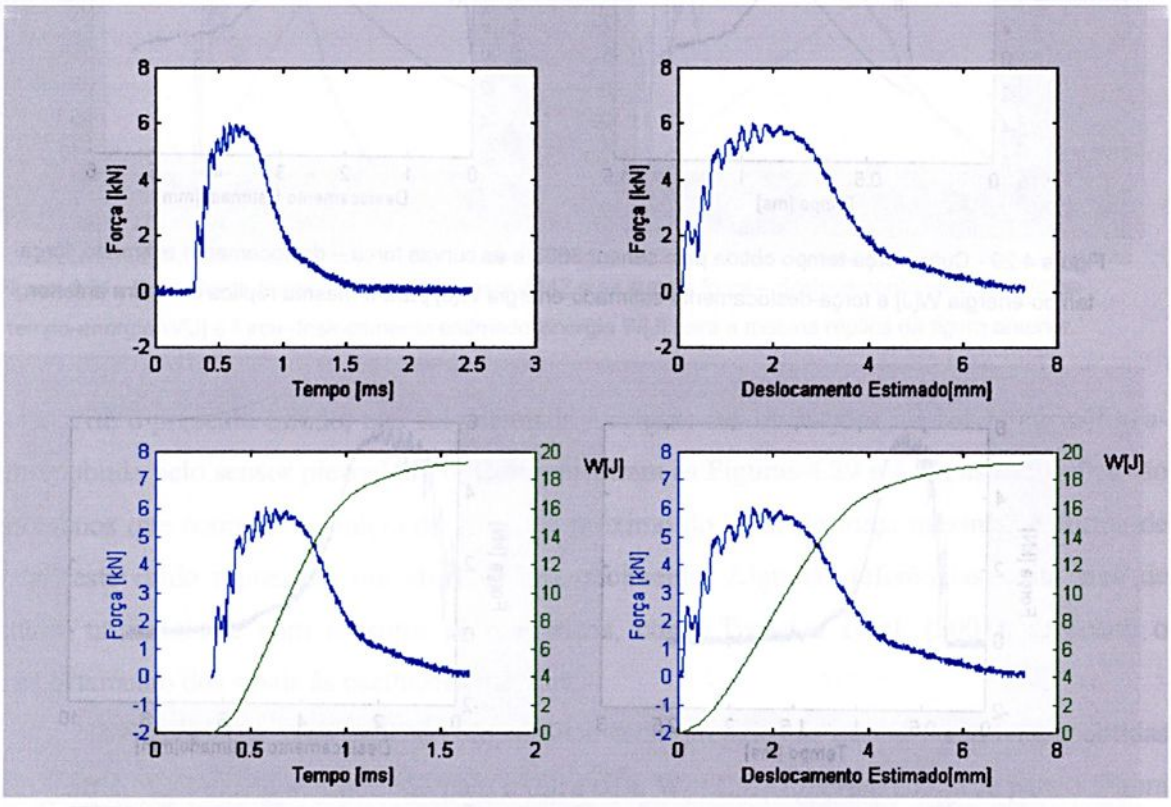


Figura 4.28 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=21J.

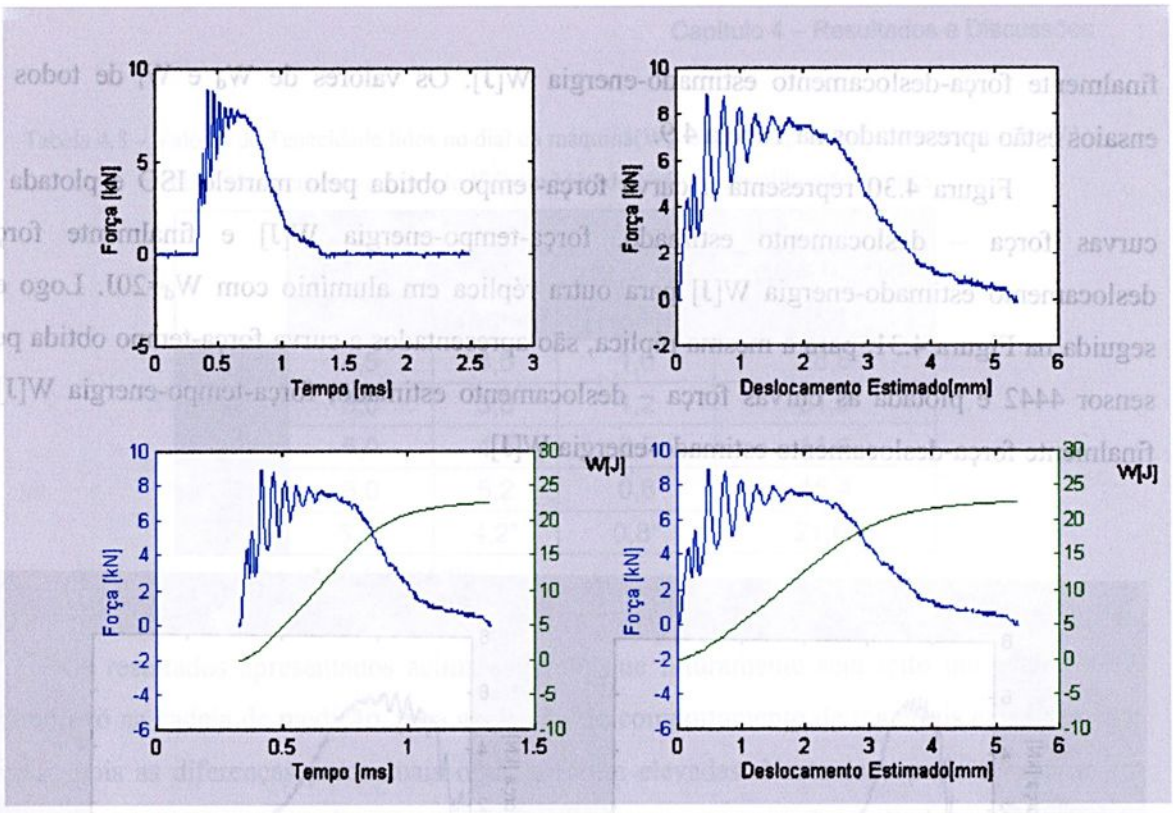


Figura 4.29 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para a mesma réplica da figura anterior.

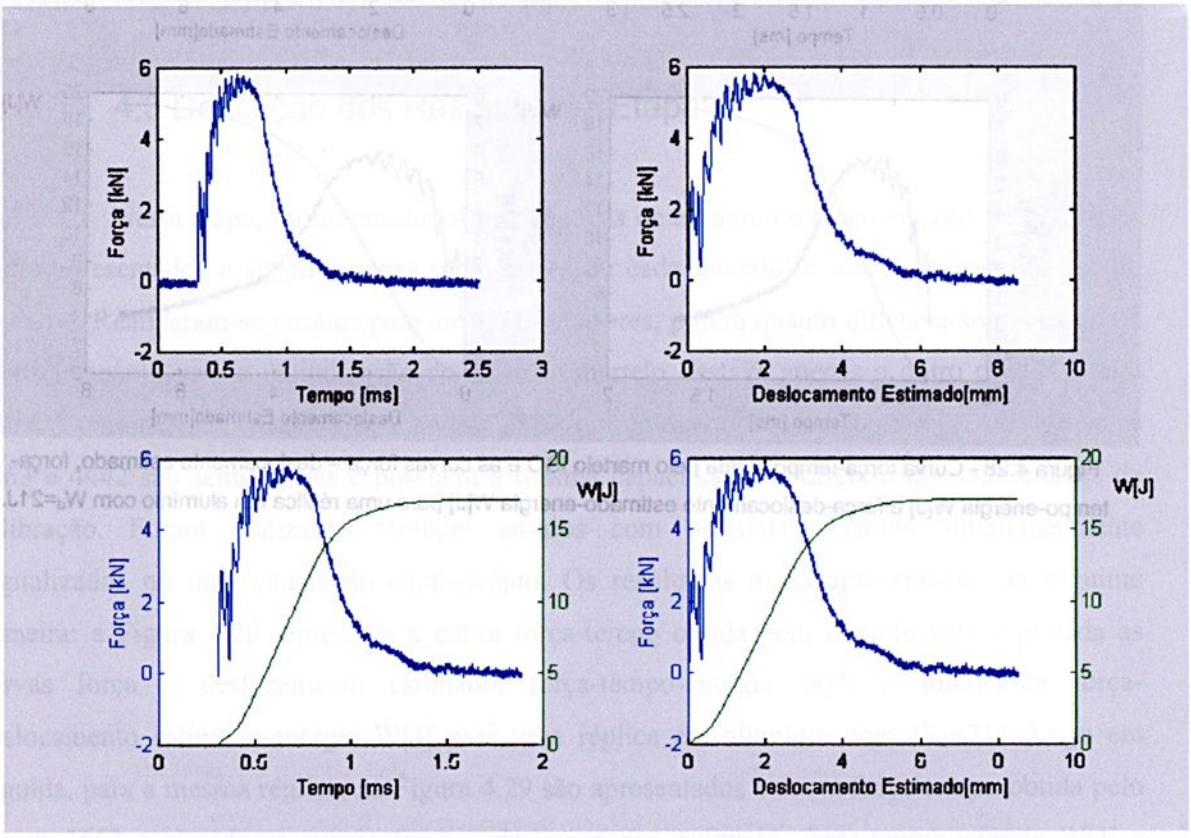


Figura 4.30 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=20J.

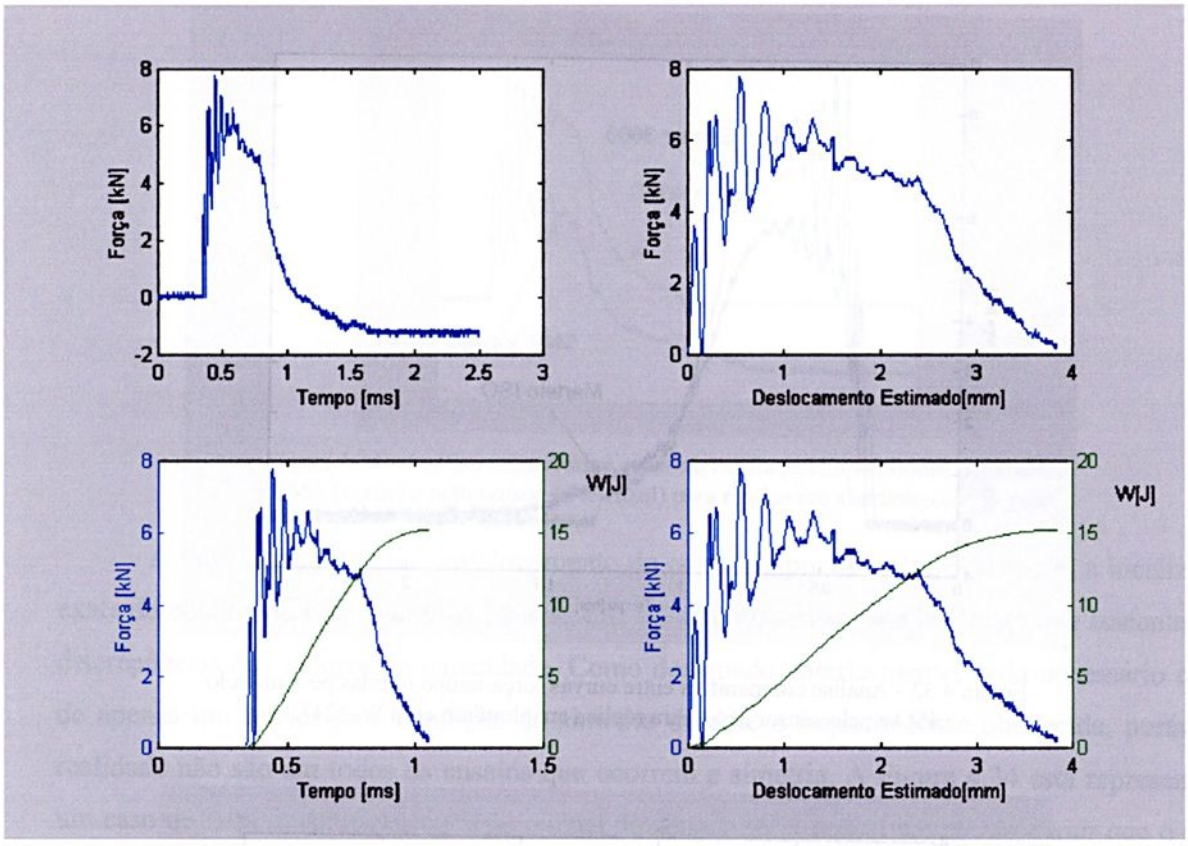


Figura 4.31 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para a mesma réplica da figura anterior.

Até o presente estudo, não foi detectada a origem das oscilações inicias na curva força-tempo obtida pelo sensor piezoelétrico. Como mostram as Figuras 4.29 e 4.31, as oscilações são fenômenos que ocorrem no início do sinal até próximo do valor de força máxima. A forma de onda deste ruído representa um sinal de amortecimento. Algumas referências nesta área de estudo, utilizando-se com sensores piezoelétricos, como Tronskar et al. (2001), associam o comportamento dos sinais às oscilações inerciais.

Na Figura 4.32, para análise comparativa, estão plotados as curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO e pelo sensor 3663 para réplica com W_d=21J. O mesmo acontece para a Figura 4.33, porém o sensor é o 4442 e a réplica com W_d=20J.

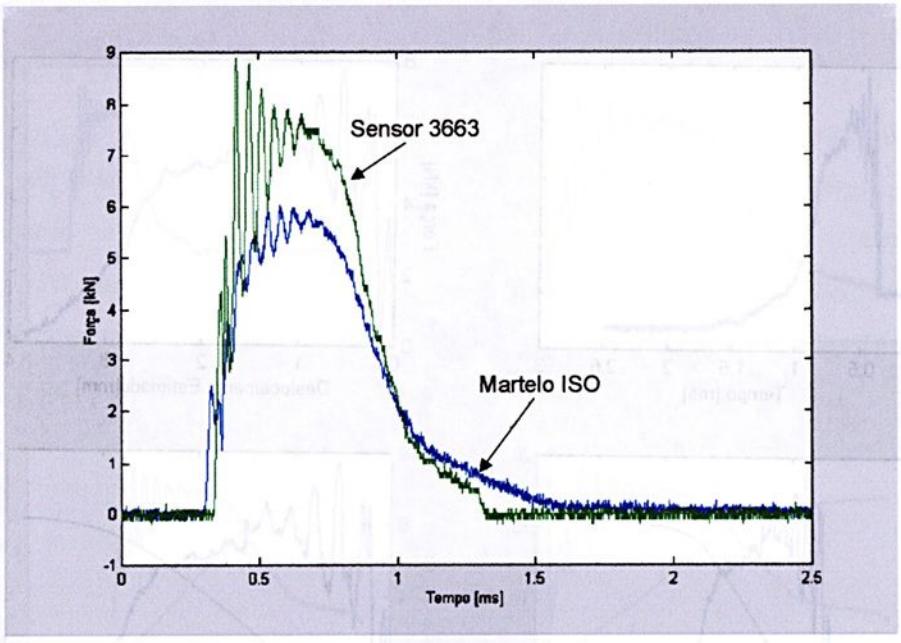


Figura 4.32 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO e pelo sensor 3663 para réplica em alumínio com W_d=21J.

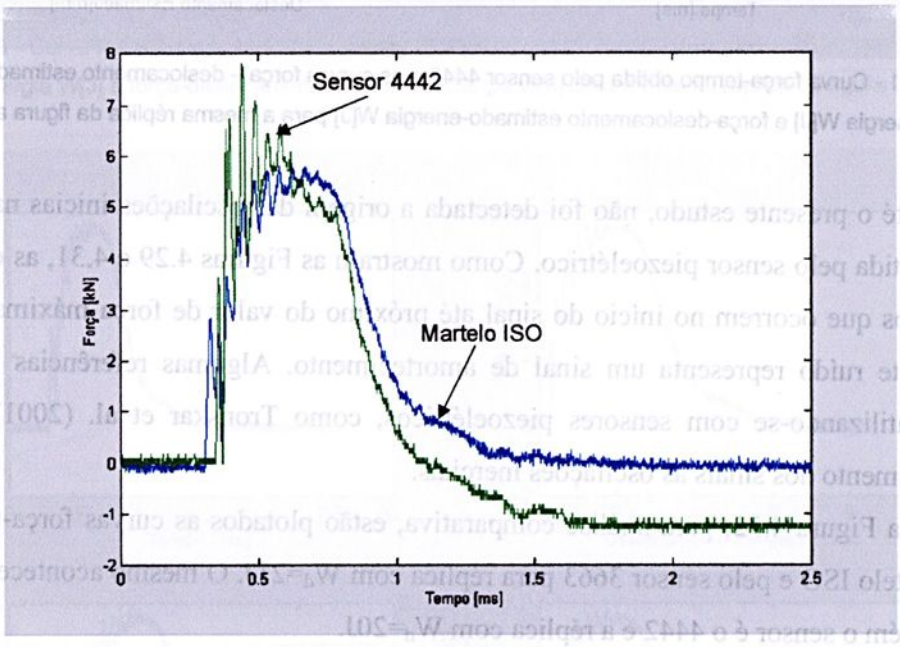


Figura 4.33 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO e pelo sensor 4442 para réplica em alumínio com W_d=20J.

Em outra análise comparativa, a figura a seguir estão apresentados as curvas força-tempo dos sensores ensaiados simultaneamente para uma réplica com W_d=20J.

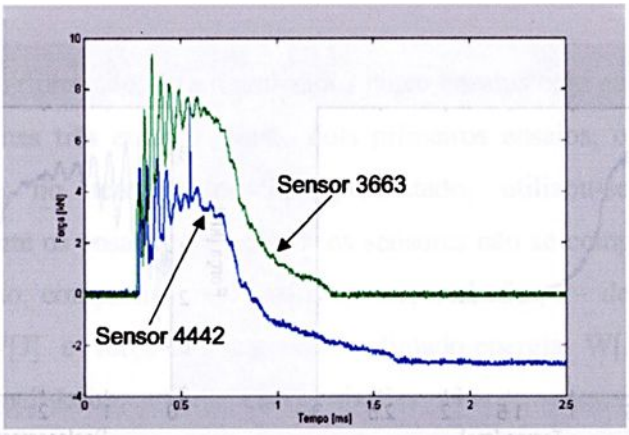


Figura 4.34 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo sensor 3663 (verde) e pelo sensor 4442 (azul) para réplica em alumínio com W_d=20J.

A falta de simetria no posicionamento do corpo-de-prova na base de apoio, a localização exata do entalhe no corpo-de-prova e a área de contato no sensor, são hipóteses que sustentam as discrepâncias dos valores de tenacidade. Como designado anteriormente, seria necessário o uso de apenas um sensor se a condição de simetria durante o impacto fosse obedecida, porém na realidade não são em todos os ensaios que ocorrem a simetria. A Figura 4.34 está representado um caso de falta de simetria, ou seja, o sinal do sensor 3663 possuí amplitude maior que o sinal do sensor 4442.

A acuracidade do ensaio está relacionada também às características do corpo de prova. Qualquer alteração no perfil ou dimensão do entalhe de um corpo de prova para outro, aliada a mínima variação na localização do entalhe, pode provocar diferenças significativas, tanto nos valores de energias como os valores de forças medidos para cada sensor. Uma quantidade de segurança sempre maior de réplicas devem ser fabricadas, de modo que os ensaios de ajuste dos equipamentos sejam efetuados e previstas as possíveis perdas de amostras devido a resultados que fogem à tendência geral das medições.

Das curvas obtidas com ambos os sensores simultaneamente, analisou-se de forma individual o sinal de cada sensor. Para tanto, foram plotadas as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J] para cada sensor separadamente. A seguir as figuras 4.35 e 4.36 estão apresentadas as curvas para o sensor 3663 e 4442 respectivamente, para uma réplica de W_d=20J.

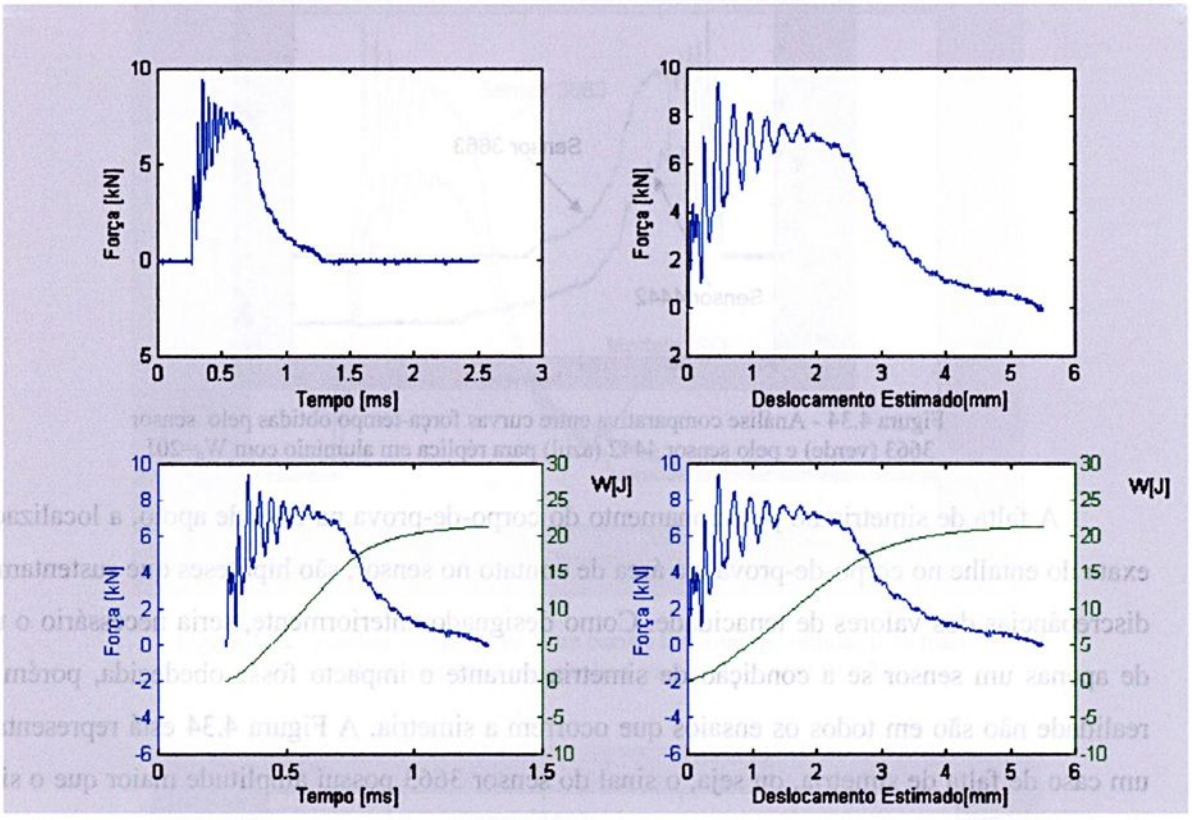


Figura 4.35 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio W_d=20J.

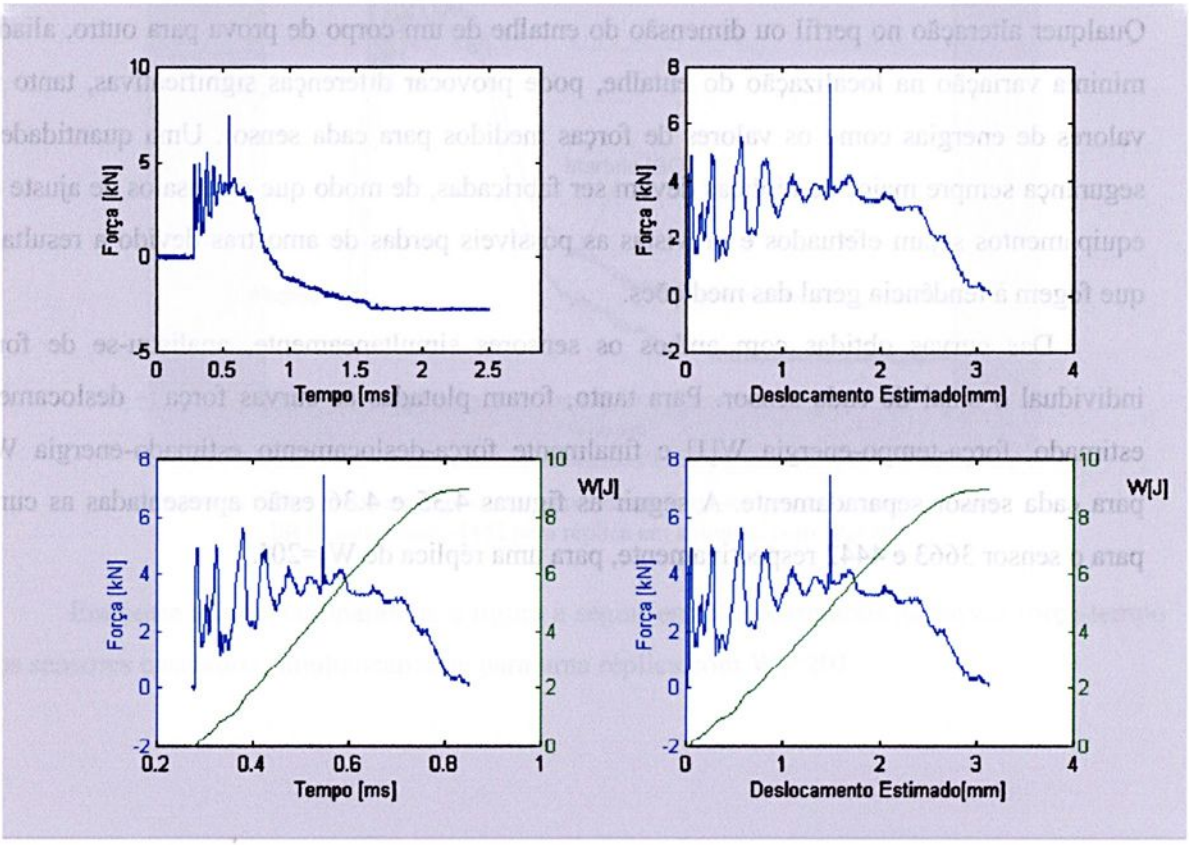


Figura 4.36 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio W_d=20J.

Como citado anteriormente, foram realizados cinco ensaios com aço ABNT 1040, porém estão apresentados apenas três ensaios. Neste dois primeiros ensaios, o que diferem, são os sensores utilizados e no terceiro ensaio apresentado, utilizou-se os dois sensores simultaneamente. Durante os ensaios com o aço, os sensores não se comportaram similarmente aos ensaios em alumínio, comprometendo assim as curvas de força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J]. Não foi possível distinguir o momento final do impacto nas curvas obtidas pelos sensores. As figuras ilustraram a interpretação acima. Na Figura 4.37, são apresentadas a curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço com W_d=24,5J. Logo em seguida, para a mesma réplica, na Figura 4.38 está apresentada a curva força-tempo obtida pelo sensor 4442.

Figura 4.39 representa a curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e plotada as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e finalmente força-deslocamento estimado-energia W[J] para outra réplica em aço com W_d=29,5J. Logo em seguida na Figura 4.40, para a mesma réplica, são apresentadas a curva força-tempo obtida pelo sensor 3663. Os valores de W_d e W_i de todos os ensaios estão apresentados na Tabela 4.10.

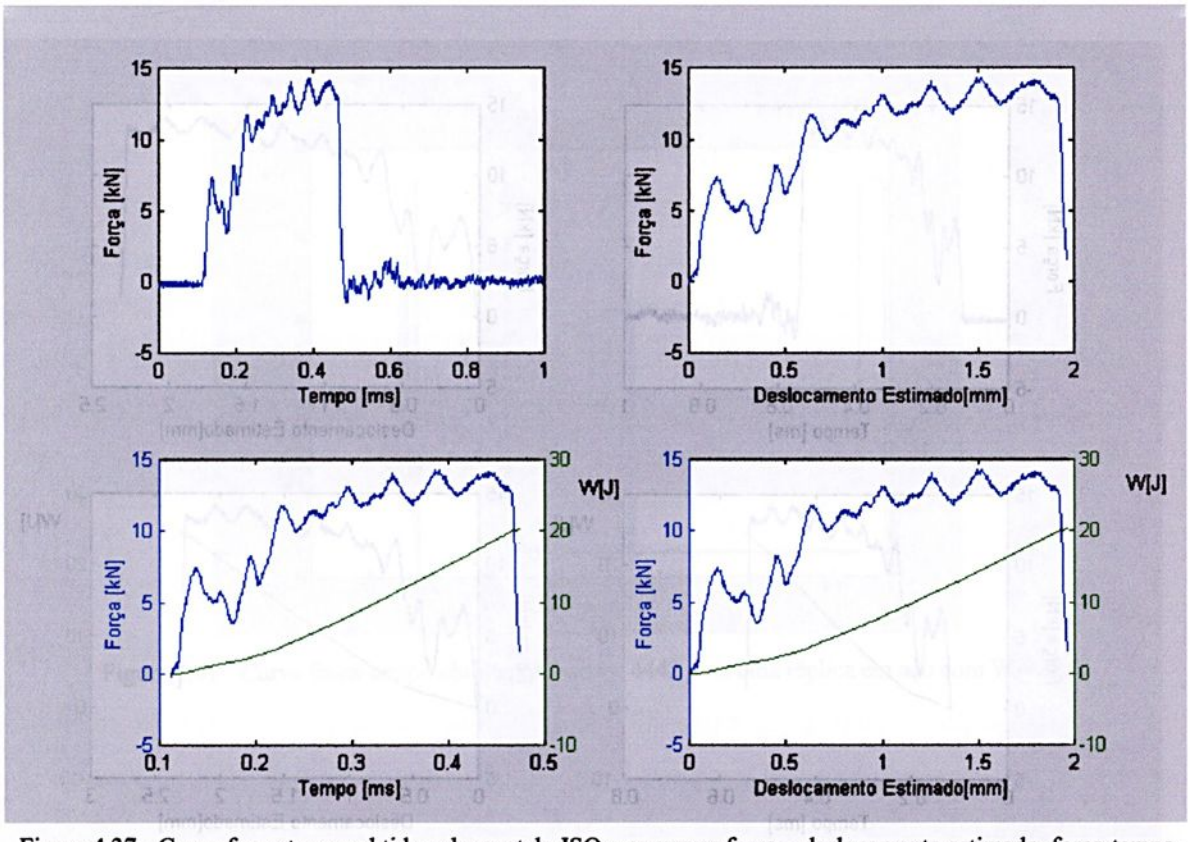


Figura 4.37 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço com W_d=24,5J.

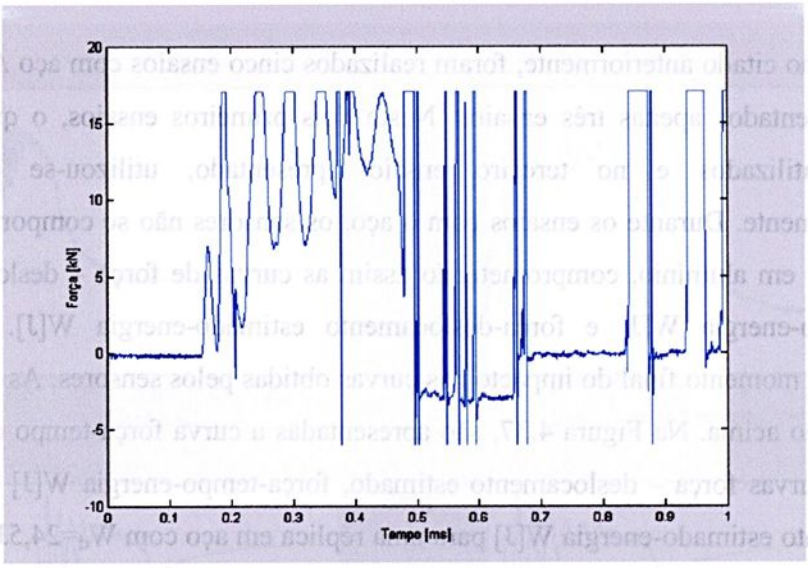


Figura 4.38- Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 para uma réplica em aço com W_d=24,5J.

Na Figura 4.38 e demais figuras onde a amplitude do ruído foi elevada, a curva que corresponde o impacto não está nítida, porém reconhece-se o momento que se iniciou o impacto, e a partir deste instante, um sinal interferente causa uma distorção na curva. Entretanto, este fenômeno não ocorre regularmente. Repare que para réplicas em alumínio, o comportamento dos sensores foi diferenciado.

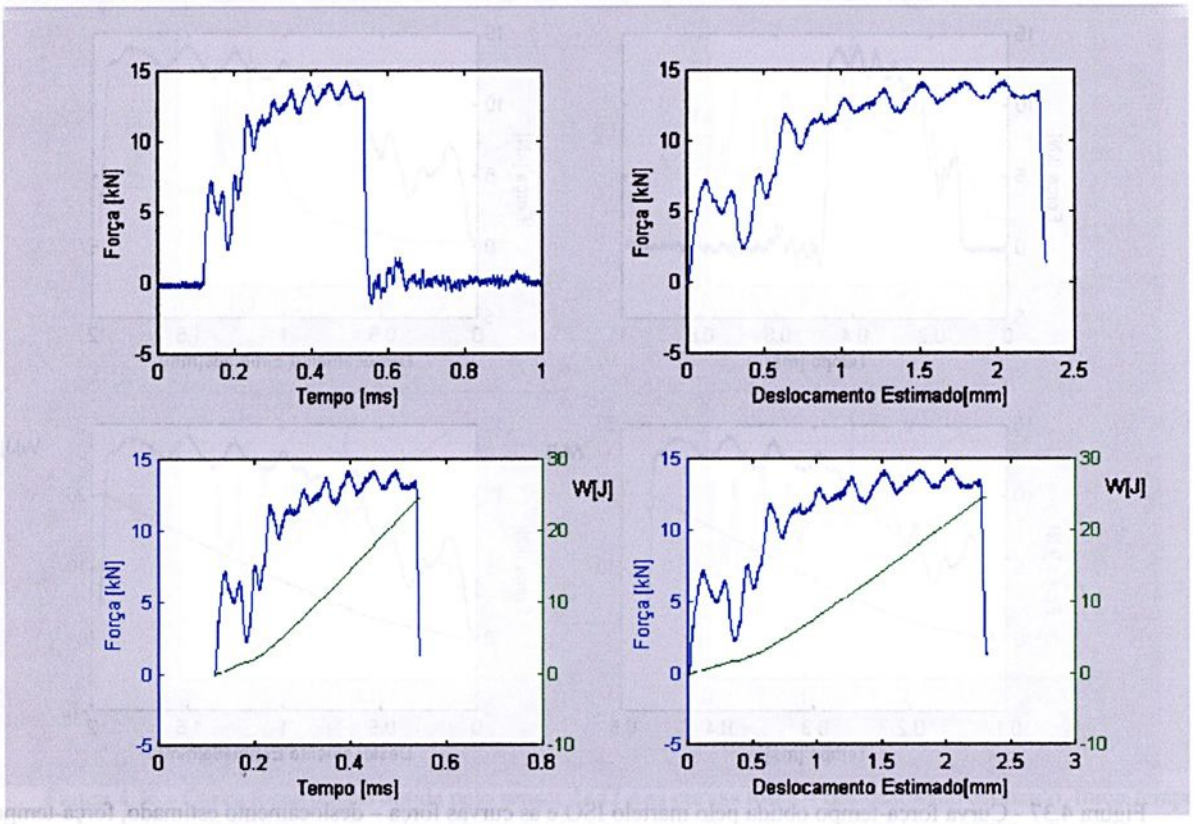


Figura 4.39 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço com W_d=29,5J.

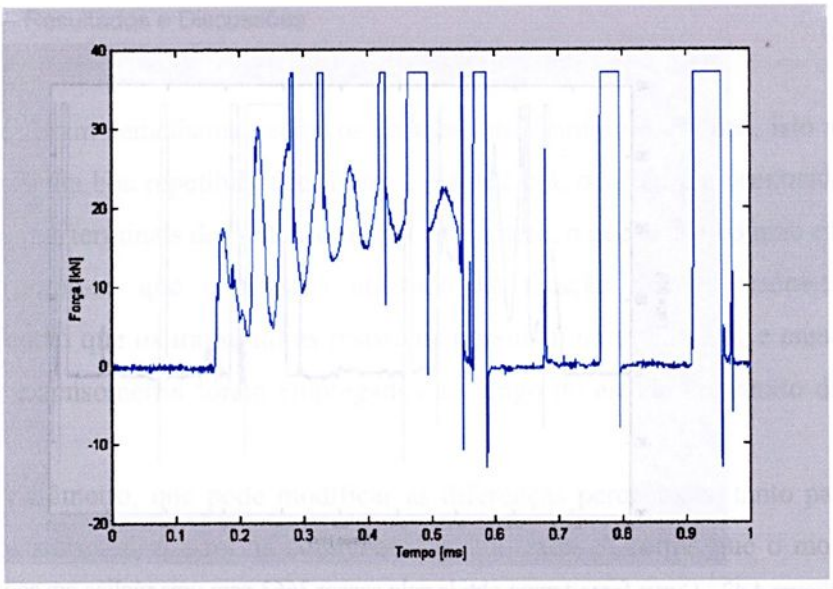


Figura 4.40- Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 para uma réplica em aço com W_d=29,5J.

Finalizando a apresentação dos resultados, o ensaio em aço ABNT 1040 com os sensores simultaneamente. Foi possível plotar apenas a curva força-tempo medida para cada sensor. A Figura 4.41 representa a curva força-tempo para o sensor 4442 e a Figura 4.42, a curva força-tempo para o sensor 3663 para uma réplica em aço com W_d=26,5J.

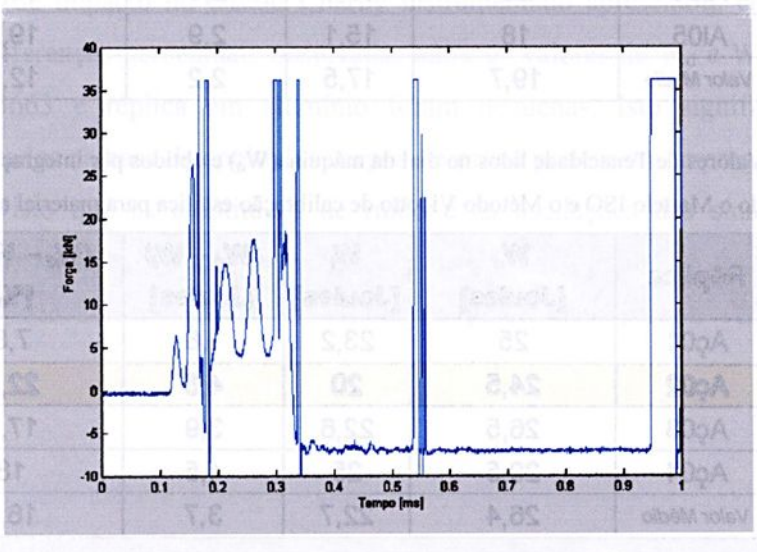


Figura 4.41 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 para uma réplica em aço com W_d=26,5J.

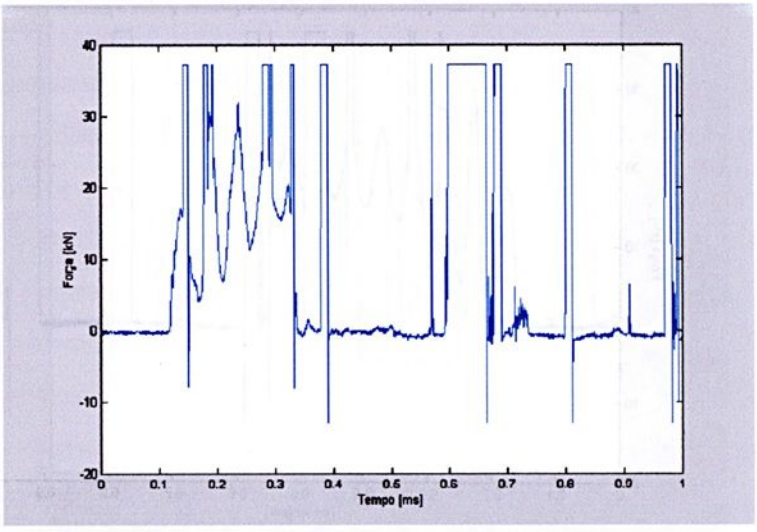


Figura 4.42 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 para uma réplica em aço com W_d=26,5J.

Tabela 4.9 – Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(W_d) e obtidos por integração numérica (W_i), observando o Martelo ISO e o Método Vidotto de calibração estática, para material alumínio.

	Réplica	W_d [Joules]	W_i [Joules]	$\lvert(W_d - W_i)\rvert$ [Joules]	$(W_d - W_i)/W_i$ [%]
Martelo ISO	Al01	20,5	18,1	2,4	13,3
	Al02	21	19,2	1,8	9,4
	Al03	19	18	1,0	5,5
	Al04	20	17,1	2,9	16,9
	Al05	18	15,1	2,9	19,2
	Valor Médio	19,7	17,5	2,2	12,9

Tabela 4.10 – Valores de Tenacidade lidos no dial da máquina(W_d) e obtidos por integração numérica (W_i), observando o Martelo ISO e o Método Vidotto de calibração estática para material aço ensaiado.

	Réplica	W_d [Joules]	W_i [Joules]	$(W_d - W_i)$ [Joules]	$(W_d - W_i)/W_i$ [%]
Martelo ISO	Aç01	25	23,2	1,8	7,8
	Aç02	**24,5**	**20**	**4,5**	**22,5**
	Aç03	26,5	22,6	3,9	17,3
	Aç04	29,5	25	4,5	18
	Valor Médio	26,4	22,7	3,7	16,3

No que diz respeito ao Martelo ISO utilizado durante alguns ensaios com os sensores piezoelétricos, o comportamento apresentado foi similar à etapa 2. As diferenças percentuais se

mantiveram, e foram semelhantes entre os ensaios em alumínio e em aço, isto significa que o transdutor apresenta boa repetibilidade. Entre a etapa 2 e 3, ocorreu um acentuado desgaste nos fios de ligação dos terminais dos extensômetros do martelo, o que causou o mau contato dos fios. Além disso, notou-se que o adesivo utilizado na fixação dos extensômetros fragilizou. Certificou-se então que os transdutores resistivos possuíam uma vida útil, e consequentemente, os ensaios de extensometria foram empregados ao longo do estudo no intuito de monitorar os martelos.

Outro parâmetro, que pode modificar as diferenças percentuais, tanto para os martelos quanto para os sensores, é a rotina computacional utilizada. A forma que o momento total de impacto é setado no sinal força-tempo causa resultados diferenciados. A rotina computacional criada para gerar as curvas força-tempo-deslocamento estimado-energia, necessita num momento que se identifique o início e final do impacto. Esta identificação é feita por um cursor sobre a curva força-tempo. A maneira do indivíduo interpretar esses pontos pode causar significativas diferenças percentuais entre W_d e W_i. O avanço tecnológico neste sentido é tornar o sistema mais operacional possível, dando a ele a função de definir o intervalo de tempo. Assim, o fator destreza do indivíduo não será mais computado nas diferenças percentuais, ou seja, não haverá uma avaliação sugestiva.

A utilização de transdutores piezoelétricos como uma nova metodologia alternativa de medida da força de impacto no ensaio Charpy instrumentado apresentou, em geral, resposta satisfatória. As diferenças percentuais observadas entre os valores de W_d e W_i, na Tabela 4.11 para o sensor 3663 e réplica em alumínio foram pequenas. Isto significa que sensores piezoelétricos locados na base de apoio dos corpos-de-prova podem ser empregados para medida de força. Haja visto que as amplitudes de ruído e as oscilações dos sinais força - tempo sustentam esta diferença percentual. O caso de falta de simetria ou falta de controle na usinagem do entalhe pode ser evidenciado se as diferenças percentuais para o sensor 4442 forem analisadas.

Tabela 4.11 – Valores de Tenacidade à fratura lidos no dial da máquina(W_d) e obtidos por integração numérica (W_i), observando os sensores 3663 e 4442, para liga de alumínio.

	Réplica	W_d [Joules]	W_i [Joules]	$\lvert(W_d - W_i)\rvert$ [Joules]	$(W_d - W_i)/W_i$ [%]
Sensor 3663	Al01	20,5	22,1	1,6	7,2
	Al02	21	22,5	1,5	6,6
	Al03	19	19,9	0,9	4,5
	Al06	20	21,3	1,3	6,1
	Al07	19,5	20,3	0,8	3,9
	Al08	19	19,2	0,2	1,1
	Valor Médio	19,8	20,8	1,1	4,9
Sensor 4442	Al04	20	15,3	4,7	30,7
	Al05	18	20,7	2,7	13,0
	Al06	20	8,9	11,1	124,7
	Al07	19,5	13,5	6,0	44,4
	Al08	Ensaio desconsiderado, vide explicação no Anexo 4, Figura A.4.13			
	Valor Médio	19,4	14,6	6,1	53,2

Nota-se ainda que os valores de W_d e W_i para os sensores 4442 e 3663 utilizados nos ensaios de aço, não aparecem tabelados. A resposta dos sensores apresentou uma amplitude elevada no ruído comprometendo a identificação do intervalo de impacto, como ilustram as figuras 4.41 e 4.42. Desta forma, não foi possível realizar os cálculos envolvidos.

Há muito ainda que entender a cerca do comportamento dos sensores piezoelétricos, embora já existem pesquisadores nesta área. São mais de 100 anos no estudo do ensaio Charpy, e 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. Porém, 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.

Este trabalho não tinha como propósito esgotar o assunto acerca da instrumentação do ensaio Charpy, o que é sabidamente improvável num período de estudo proporcionado por um curso de mestrado. Avançar um pouco mais em direção ao entendimento, abrir frentes de estudo e implicações deste tipo de implementação foi na realidade a grande meta proposta.

Conclusões

Apresentou-se, neste trabalho, as metodologias experimentais do ensaio Charpy instrumentado, em conformidade com a ISO 14.556(2000). Além disso, uma proposta de nova metodologia para medida de força durante o impacto foi apresentada. Foram investigados alguns parâmetros que podem influenciar nos resultados.

O trabalho foi dividido em três etapas, as quais dependeram da cadeia de insrumentação empregada. A etapa 1 consistiu na aplicação da técnica extensométrica para compor a célula de carga GC3M e um estudo preliminar com o protótipo do condicionador de sinais dinâmico para extensometria. A etapa 2 compreendeu uma análise comparativa entre os martelos ISO e GC3M, uma análise comparativa entre os métodos de calibração estática e testes com o condicionador de sinais dinâmico para extensometria. A etapa 3 compreendeu a aplicação de transdutores piezoelétricos posicionados na base de apoio dos corpos de prova. As seguintes conclusões, portanto, são enumeradas abaixo.

- As células de carga resistivas(martelos), apresentaram boa sensibilidade e excelente linearidade, além de conformidade com a norma, porém são susceptíveis ao tempo de uso. O adesivo para a extensometria empregada fragiliza com o tempo, impossibilitando acompanhar a deformação do martelo;

- A escolha da geometria do martelo está intimamente relacionada com a rigidez e a sensibilidade. Quanto menor a rigidez, maiores serão os efeitos das ondas de choque nos extensômetros e maior a sensibilidade do martelo;

- Independentemente do martelo, os valores de W_{iV} obtidos pela calibração estática pelo método Vidotto estão mais próximos dos valores de W_d do que os valores de W_{iR} obtidos pelo método Rodrigues. Sendo assim, pode-se considerar que a calibração efetuada pelo método Vidotto é mais eficaz. A norma recomenda ainda que a calibração seja feita na

unesp

própria máquina, o que garante a posição exata de contato entre o martelo e o corpo-de-prova. Os próximos avanços serão focados na construção de dispositivos para aplicação de carga e fixação de uma célula de carga par calibração do martelo no próprio pêndulo sem a necessidade de removê-lo da máquina;

- O nível de ruído é outro fator que pode comprometer a qualidade do sinal. Tanto no sinal dos martelos como no sinal dos sensores, há a necessidade de filtragem. Estudos preliminares indicam a possibilidade do uso de filtros digitais, já que os filtros analógicos podem diminuir a resposta em freqüência da cadeia de medição;

- O uso de testes de resposta em freqüência no condicionador de sinais dinâmico para extensometria foi importantíssimo para tornar o aparelho mais dedicado a medir eventos com curta duração de tempo, como o impacto;

- A cadeia de medição piezoelétrica empregada na etapa 3 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.

- A rotina computacional empregada exerce influência nos cálculos envolvidos. Portanto é necessário tornar a interface com o usuário mais simples, de forma que a destreza do usuário não comprometa o sinal;

5.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas das recomendações e propostas de atividades que podem enriquecer e dar continuidade ao trabalho desenvolvido até o momento.

- efetuar o tratamento estatístico dos resultados, considerando não somente as medidas de dispersão usuais, mas também o efeito da propagação dos erros de medida por meio dos elementos que compõem os sistemas de medição.

- estudar o efeito de filtros digitais e analógicos no ensaio Charpy instrumentado.
- desenvolver uma rotina computacional de fácil manuseio para o usuário;
- utilizar equipamentos flexíveis na setagem do número de pontos para discretização e taxa de amostragem e comparar com o osciloscópio;
- efetuar ensaios com corpos-de-prova submetidos a variações de microestruturas obtidas por tratamentos térmicos.
- desenvolver um pêndulo Charpy com dimensões reduzidas e utilizar a mesma cadeia de medição;
- efetuar a calibração estática na própria máquina e comparar com os métodos já existentes;
- efetuar um estudo no adesivo do extensômetro e determinar qual a vida útil do transdutor;
- simular os níveis de deformação do martelo em um programa de análise numérica e classificar a geometria do martelo conforme o material a ser ensaiado;
- efetuar o processo de instrumentação nos corpos-de-prova e comparar com os resultados dos martelos instrumentados;

Referências Bibliográficas

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

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

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.

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.

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.

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.

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.

CUN-JIAN, L. Effects of temperature and loading rate on fracture toughness of structural steels. Materials and Design, v.21, p.27-30, 1999.

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.

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.

unesp

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.

KOBAYASHI, T., TODA, H. & MASUDA, T., 2001, "Analysis of test data obtained from Charpy-V and impact tensile test", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.1, pp.305-312.

MANAHAN, M. P. & STONESIFER, R. B., 2001, "Studies toward optimum instrumented striker designs", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.1, p.151-162.

MANAHAN, M. P., STONESIFER, R. B., SIEWERT, T. A., MCCOWAN, C. N. & VIGLIOTTI, D. P., 2001, "Observations on difference between the energy determined using an Instrumented striker and dial/enconder energy", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.1, p.45-60.

MORITA, S., OTANI, M. & KOBAYASHI, T., 2001 "Problems related to the measurement of load signal in the Instrumented Charpy impact test", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.1, p.135-42.

TANGUY, B., PIQUES, R. & PINEAU, A., 2001, "Experimental analysis of Charpy V-notch specimens", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.1, p.425-32.

TANGUY, B., BESSON, J., PIQUES, R., PINEAU, A., 2001, "Numerical modeling of Charpy V-notch tests", In: Charpy Centenary Conference 2001, France, v.2, p.737-44.

TRONSKAR, J.P., MANNAN, M.A., LAI, M.O., 2001, "Direct measurement of displacement in Instrumented Charpy impact testing for Structural Integrity Assessment". In: Journal of Testing and Evaluation, vol.29, nº3, p. 246-57.

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

DIETER, G. E. Brittle Fracture and Impact Testing. In:__. Mechanical metallurgy. 4.ed. London: McGraw-Hill, 1988. p.471-500.

unesp

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.

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).

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.

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

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., Resistence-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.

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.

DALLY, J. W., RILEY, W. F. Dynamic Response of Strain, In:_Experimental Stress Analysis, 3. ed., EUA, McGraw-Hill, 1991. pp. 190-192

VIDOTTO, G. J., Calibração Estática/Dinâmica conforme a norma ISO 14.556 para o ensiao Charpy instrumentado. Ilha Solteira, 2003. 70p. Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

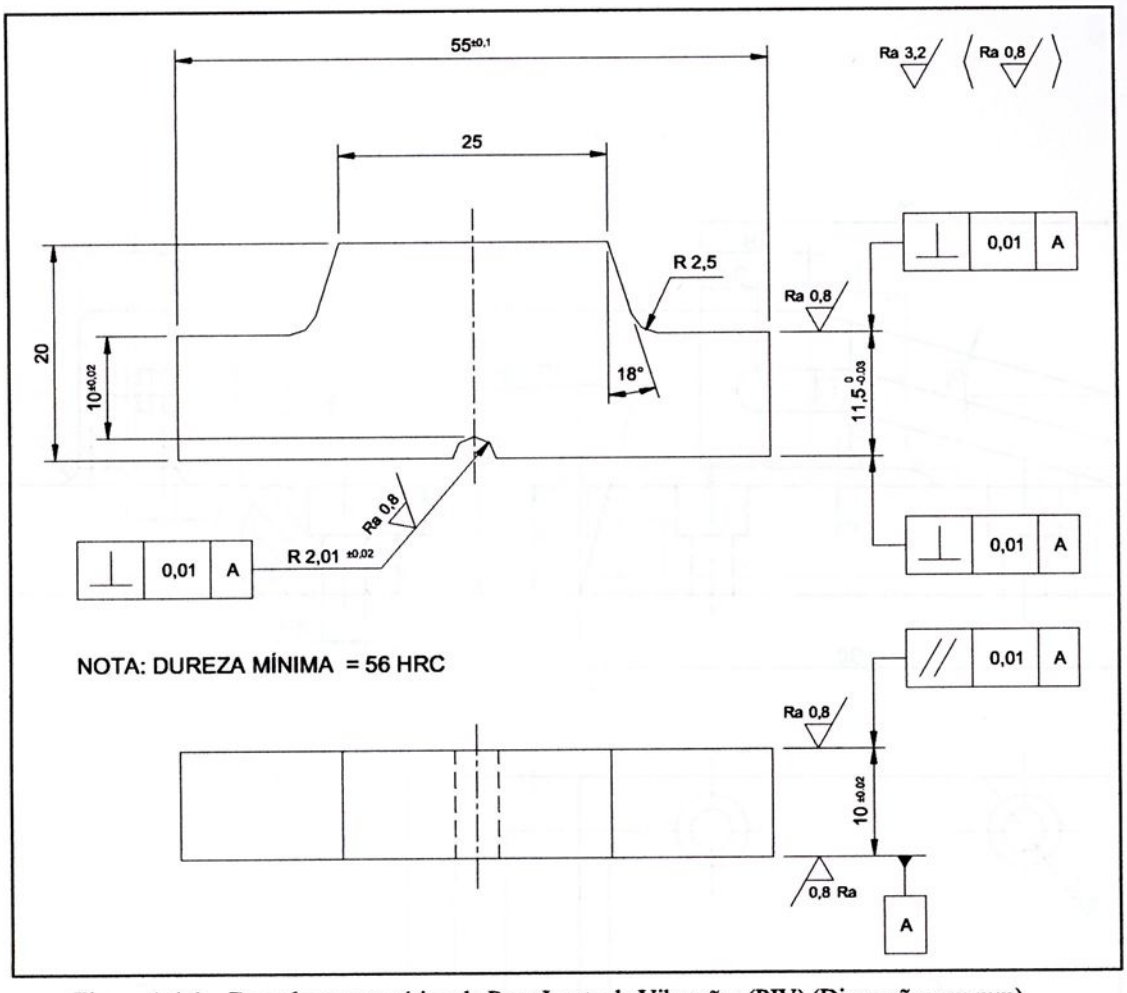


Figura A.1.1 – Desenho esquemático da Peça Isenta de Vibrações (PIV) (Dimensões em mm).

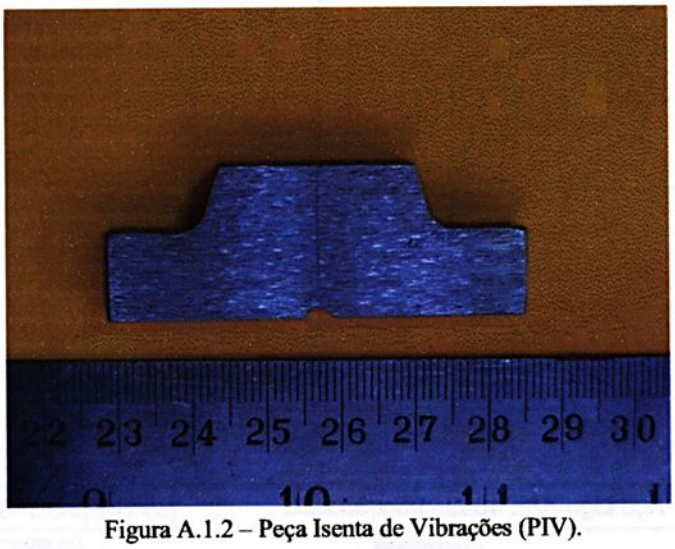
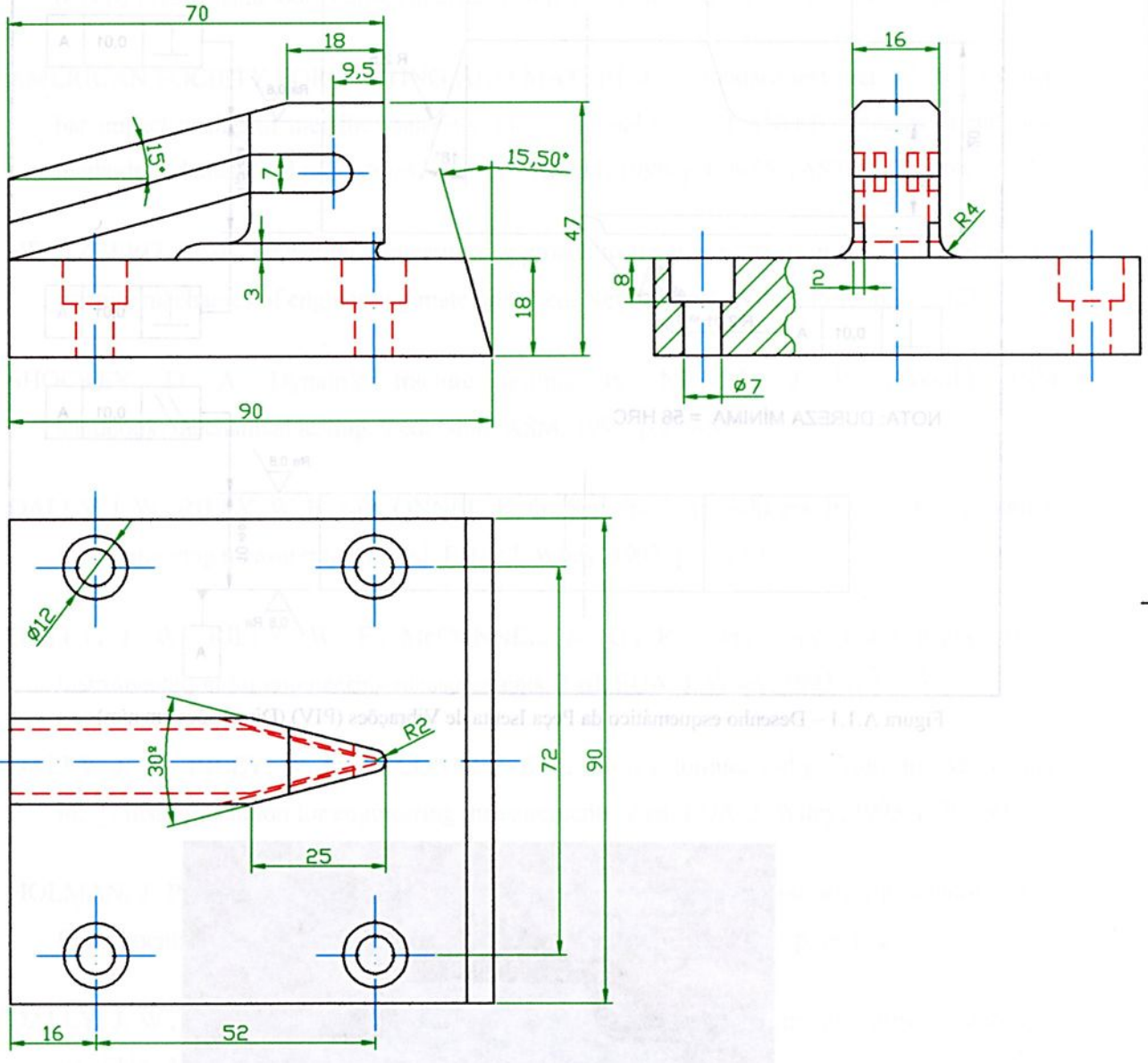


Figura A.1.2 – Peça Isenta de Vibrações (PIV).



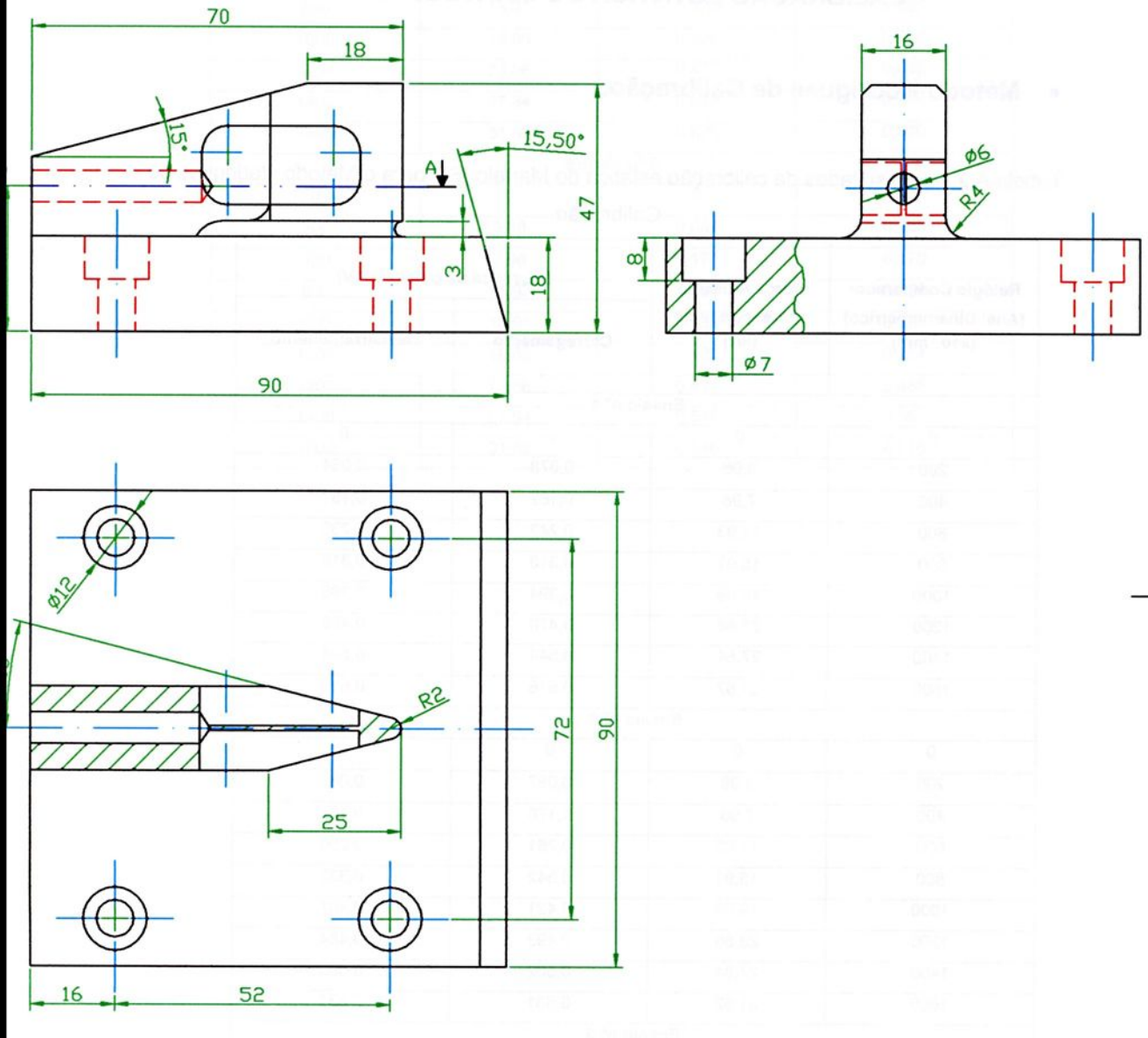
Material	Aço Liga SAE 4340 - 95 x 95 x 50	Qtde	01 peça	Dimensões em mm
Aluno: Eduardo Leira Kruger	Professor: Ruis Camargo Tokimatsu	Departamento: Engenharia Mecânica		Escala: 1 : 1,25

GC3M — Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais

unesp — FACULDADE DE ENHENHARIA — Campus de Ilha Solteira

Título: **MARTELO ISO**

Área: Materiais e Processos de Fabricação | Anexo 1 | Pg 100



corte AA

Material	Aço Liga SAE 4340 - 95 x 95 x 50	Qtde	01 peça	Dimensões em mm	
Aluno: Eduardo Leira Kruger	Professor: Ruis Camargo Tokimatsu	Departamento: Engenharia Mecânica		Escala: 1 : 1,25	
GC3M – Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais	unesp FACULDADE DE ENHENHARIA – Campus de Ilha Solteira	Título: MARTELO GC3M			
		Área: Materiais e Processos de Fabricação		Anexo 1	Pg 101

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

Cartas de calibração dos Martelos ISO e GC3M
CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO MARTELO ISO.

- **Método Rodrigues de Calibração.**

Tabela A.2.1 – Resultados da calibração estática do Martelo ISO para o Método Rodrigues de Calibração.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Ensaio nº 1			
0	0	0	0
200	3,98	0,078	0,064
400	7,96	0,162	0,151
600	11,93	0,242	0,235
800	15,91	0,318	0,316
1000	19,89	0,394	0,396
1200	23,86	0,470	0,469
1400	27,84	0,544	0,544
1600	31,82	0,616	0,616
Ensaio nº 2			
0	0	0	0
200	3,98	0,087	0,080
400	7,96	0,176	0,167
600	11,93	0,261	0,250
800	15,91	0,342	0,332
1000	19,89	0,421	0,407
1200	23,86	0,493	0,484
1400	27,84	0,562	0,560
1600	31,82	0,631	0,631
Ensaio nº 3			
0	0	0	0
200	3,98	0,084	0,081
400	7,96	0,173	0,168
600	11,93	0,257	0,253
800	15,91	0,339	0,334
1000	19,89	0,416	0,407
1200	23,86	0,490	0,485
1400	27,84	0,559	0,560
1600	31,82	0,628	0,628
Ensaio nº 4			
0	0	0	0
200	3,98	0,084	0,081

400	7,96	0,169	0,169
600	11,93	0,251	0,249
800	15,91	0,329	0,336
1000	19,89	0,405	0,414
1200	23,86	0,477	0,486
1400	27,84	0,546	0,554
1600	31,82	0,620	0,620
Ensaio nº 5			
0	0	0	0
200	3,98	0,084	0,083
400	7,96	0,171	0,170
600	11,93	0,254	0,256
800	15,91	0,333	0,336
1000	19,89	0,400	0,414
1200	23,86	0,484	0,486
1400	27,84	0,548	0,555
1600	31,82	0,618	0,618

CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO MARTELO ISO.

- **Método Vidotto de Calibração.**

Tabela A.2.2 – Resultados da calibração estática do Martelo ISO para o Método Vidotto de Calibração.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Ensaio nº 1			
0	0	0	0
200	3,98	0,077	0,061
400	7,96	0,155	0,136
600	11,93	0,232	0,211
800	15,91	0,308	0,286
1000	19,89	0,382	0,363
1200	23,86	0,457	0,439
1400	27,84	0,528	0,514
1600	31,82	0,602	0,602
Ensaio nº 2			
0	0	0	0
200	3,98	0,066	0,061
400	7,96	0,141	0,135
600	11,93	0,220	0,209
800	15,91	0,298	0,286
1000	19,89	0,378	0,363
1200	23,86	0,454	0,438
1400	27,84	0,531	0,513
1600	31,82	0,605	0,605
Ensaio nº 3			
0	0	0	0
200	3,98	0,071	0,068
400	7,96	0,148	0,142
600	11,93	0,225	0,217
800	15,91	0,303	0,294
1000	19,89	0,383	0,370
1200	23,86	0,461	0,447
1400	27,84	0,538	0,522
1600	31,82	0,612	0,612
Ensaio nº 4			
0	0	0	0
200	3,98	0,071	0,068
400	7,96	0,146	0,143
600	11,93	0,225	0,216

800	15,91	0,304	0,294
1000	19,89	0,383	0,371
1200	23,86	0,461	0,446
1400	27,84	0,537	0,522
1600	31,82	0,612	0,612
Ensaio nº 5			
0	0	0	0
200	3,98	0,070	0,068
400	7,96	0,146	0,142
600	11,93	0,225	0,217
800	15,91	0,304	0,294
1000	19,89	0,383	0,371
1200	23,86	0,461	0,446
1400	27,84	0,537	0,522
1600	31,82	0,613	0,613

CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO MARTELO GC3M.

- **Método Rodrigues de Calibração.**

Tabela A.2.3 – Resultados da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Rodrigues de Calibração.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Ensaio nº 1			
0	0	0	0
200	3,98	0,166	0,144
400	7,96	0,333	0,309
600	11,93	0,499	0,482
800	15,91	0,664	0,630
1000	19,89	0,829	0,796
1200	23,86	0,990	0,963
1400	27,84	1,154	1,134
1600	31,82	1,314	1,314
Ensaio nº 2			
0	0	0	0
200	3,98	0,159	0,153
400	7,96	0,327	0,318
600	11,93	0,492	0,484
800	15,91	0,659	0,650
1000	19,89	0,828	0,819
1200	23,86	0,990	0,986
1400	27,84	1,156	1,153
1600	31,82	1,318	1,318
Ensaio nº 3			
0	0	0	0
200	3,98	0,157	0,153
400	7,96	0,322	0,318
600	11,93	0,487	0,484
800	15,91	0,666	0,651
1000	19,89	0,822	0,819
1200	23,86	0,986	0,988
1400	27,84	1,149	1,155
1600	31,82	1,312	1,312
Ensaio nº 4			
0	0	0	0
200	3,98	0,155	0,153
400	7,96	0,321	0,318
600	11,93	0,484	0,485

800	15,91	0,651	0,651
1000	19,89	0,820	0,822
1200	23,86	0,984	0,989
1400	27,84	1,148	1,156
1600	31,82	1,317	1,317
Ensaio nº 5			
0	0	0	0
200	3,98	0,155	0,152
400	7,96	0,320	0,318
600	11,93	0,485	0,484
800	15,91	0,652	0,652
1000	19,89	0,825	0,822
1200	23,86	0,992	0,990
1400	27,84	1,155	1,158
1600	31,82	1,322	1,322

CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO MARTELO GC3M.

- **Método Vidotto de Calibração.**

Tabela A.2.4 – Resultados da calibração estática do Martelo GC3M para o Método Vidotto de Calibração.

Relógio Comparador (Anel Dinamométrico) ($x10^{-3}$ mm)	Força Aplicada Correspondente (kN)	Diferença de potencial (V)	
		Carregamento	Descarregamento
Ensaio nº 1			
0	0	0	0
200	3,98	0,151	0,139
400	7,96	0,299	0,290
600	11,93	0,440	0,433
800	15,91	0,579	0,572
1000	19,89	0,715	0,708
1200	23,86	0,850	0,837
1400	27,84	0,979	0,959
1600	31,82	1,102	1,102
Ensaio nº 2			
0	0	0	0
200	3,98	0,151	0,141
400	7,96	0,299	0,290
600	11,93	0,440	0,434
800	15,91	0,578	0,573
1000	19,89	0,714	0,707
1200	23,86	0,848	0,835
1400	27,84	0,976	0,956
1600	31,82	1,099	1,099
Ensaio nº 3			
0	0	0	0
200	3,98	0,151	0,142
400	7,96	0,299	0,292
600	11,93	0,440	0,434
800	15,91	0,578	0,573
1000	19,89	0,714	0,707
1200	23,86	0,845	0,835
1400	27,84	0,974	0,955
1600	31,82	1,097	1,097
Ensaio nº 4			
0	0	0	0
200	3,98	0,152	0,143
400	7,96	0,300	0,291
600	11,93	0,440	0,435

800	15,91	0,578	0,574
1000	19,89	0,712	0,707
1200	23,86	0,846	0,835
1400	27,84	0,974	0,953
1600	31,82	1,097	1,097
Ensaio nº 5			
0	0	0	0
200	3,98	0,151	0,143
400	7,96	0,299	0,292
600	11,93	0,440	0,434
800	15,91	0,577	0,574
1000	19,89	0,713	0,707
1200	23,86	0,845	0,834
1400	27,84	0,972	0,952
1600	31,82	1,098	1,098

As curvas apresentadas a seguir representam o ensaio considerando o fator de calibração adquirido pelo Método Rodrigues de calibração para cada martelo. A Figura A.3.1(a) e A.3.2(a) representam o sinal de força em função do tempo do aço 4140, ensaiado com o martelo ISO, ambas com 29 Joules de energia absorvida lida na máquina. Na Figura A.3.1(b) e A.3.2(b) ilustram as curvas força em função do deslocamento estimado em cada ensaio. Já na Figura A.3.1(c) e A.3.2(c) tem-se as curvas força-tempo e Tenacidade em função do tempo, e finalmente na Figura A.3.1(d) e A.3.2(d) as curvas força-deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento.

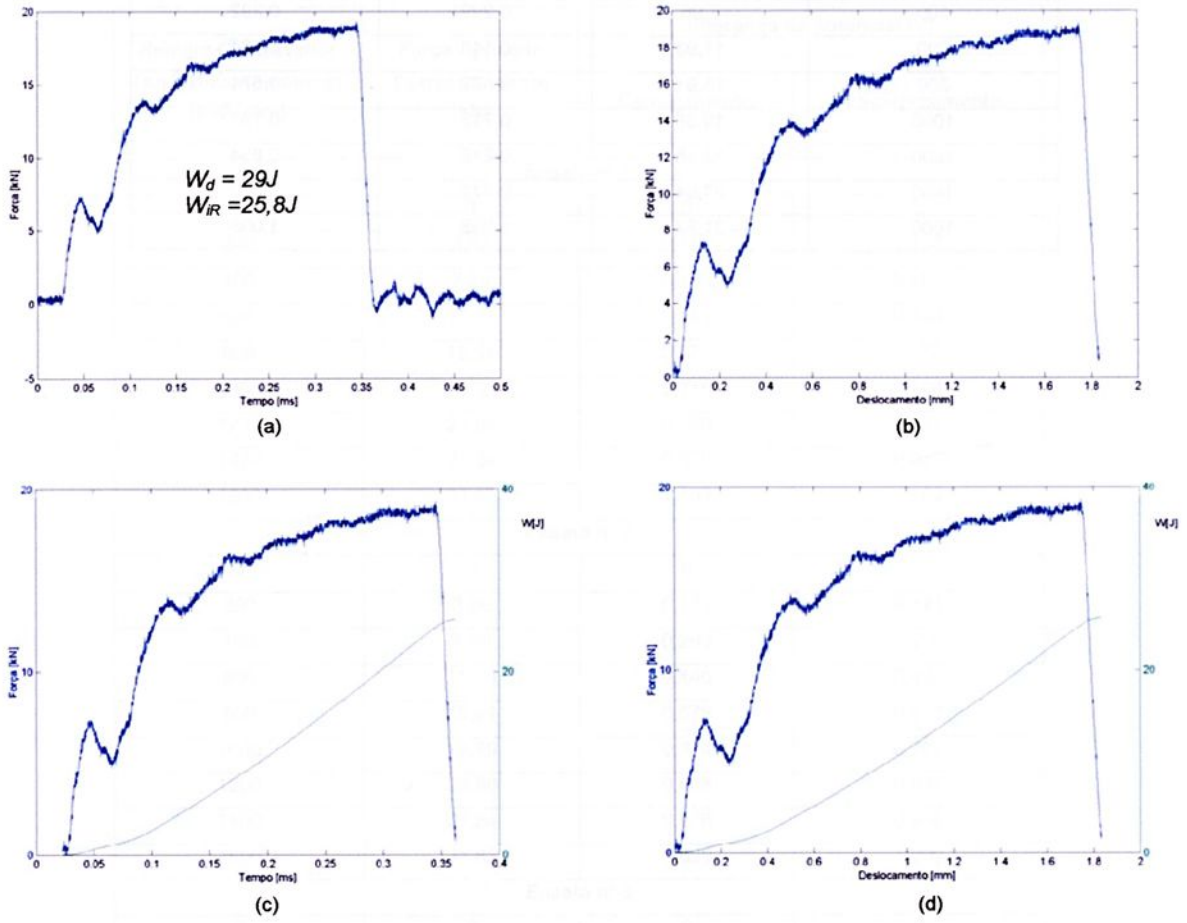
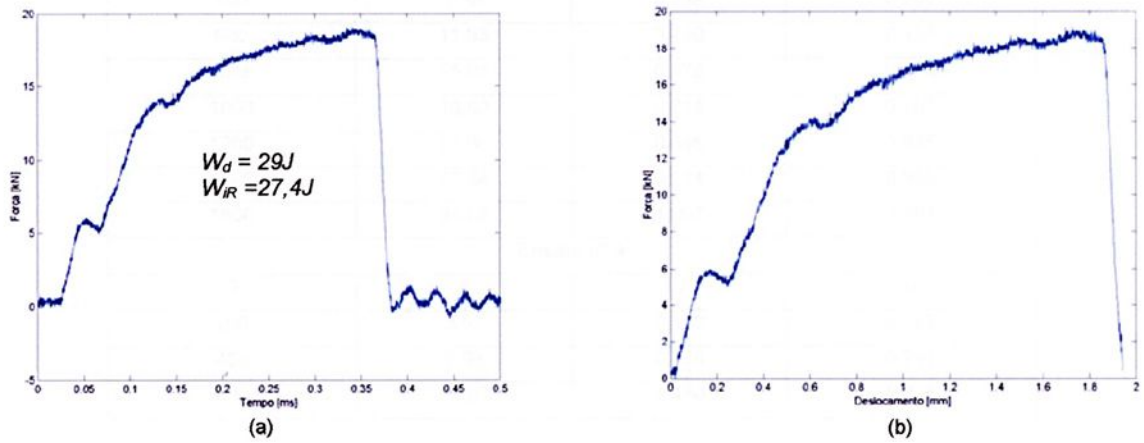


Figura A.3.1 – Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Rodrigues de Calibração para uma réplica de W_d=29J.



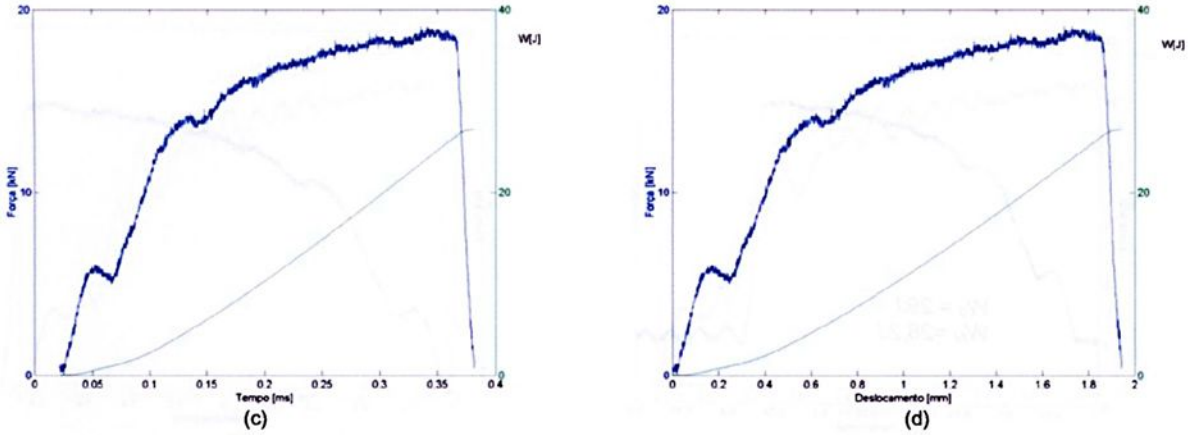


Figura A.3.2– Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Rodrigues de Calibração para uma réplica de W_d=29J.

As curvas apresentadas a seguir representam o ensaio considerando o fator de calibração adquirido pelo Método Vidotto de calibração para cada martelo. A Figura A.3.3(a) e A.3.4(a) representam o sinal de força em função do tempo do aço 4140, ensaiado com o martelo ISO, ambas com 29 Joules de energia absorvida lida na máquina. Na Figura A.3.3(b) e A.3.4(b) ilustram as curvas força em função do deslocamento estimado em cada ensaio. Já na Figura A.3.3(c) e A.3.4(c) tem-se as curvas força-tempo e Tenacidade em função do tempo, e finalmente na Figura A.3.3(d) e A.3.4(d) as curvas força-deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento.

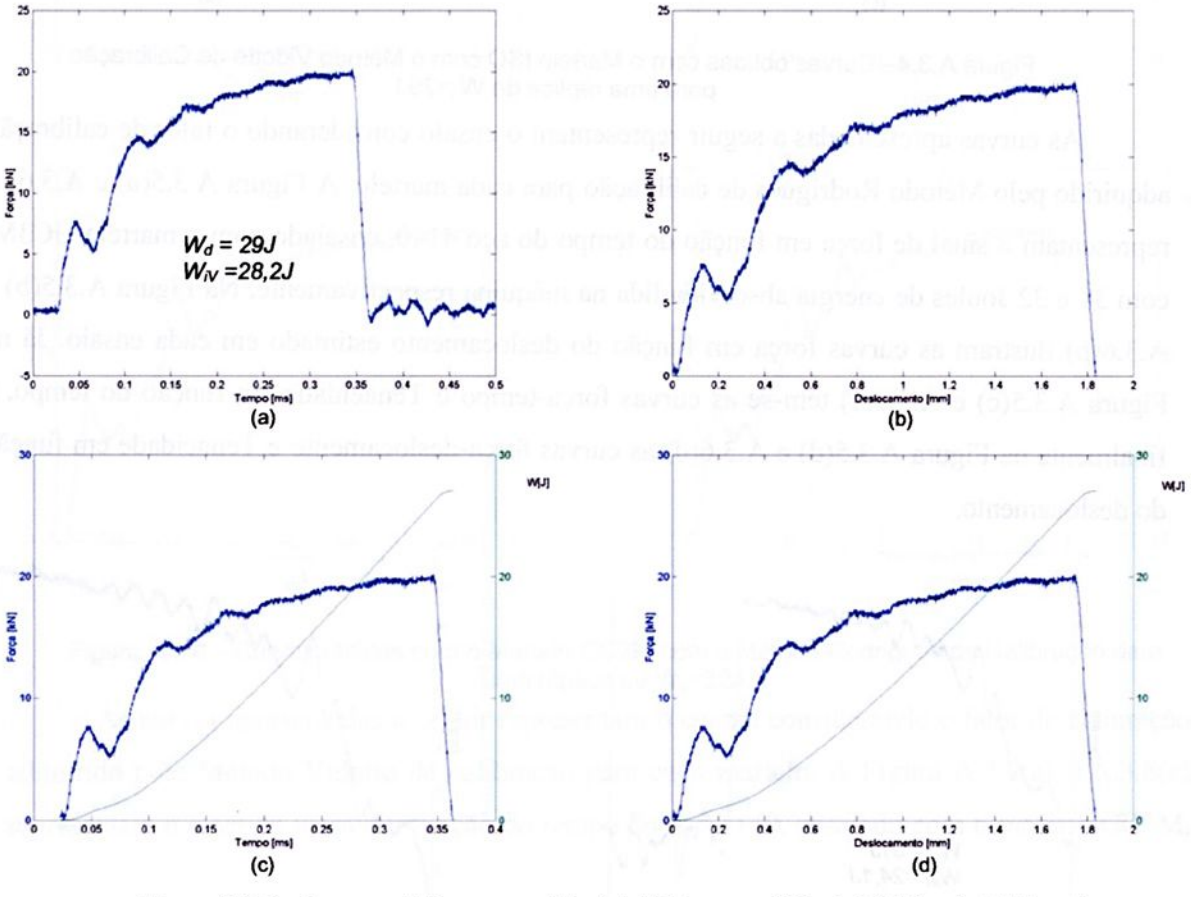


Figura A.3.3– Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de W_d=29J.

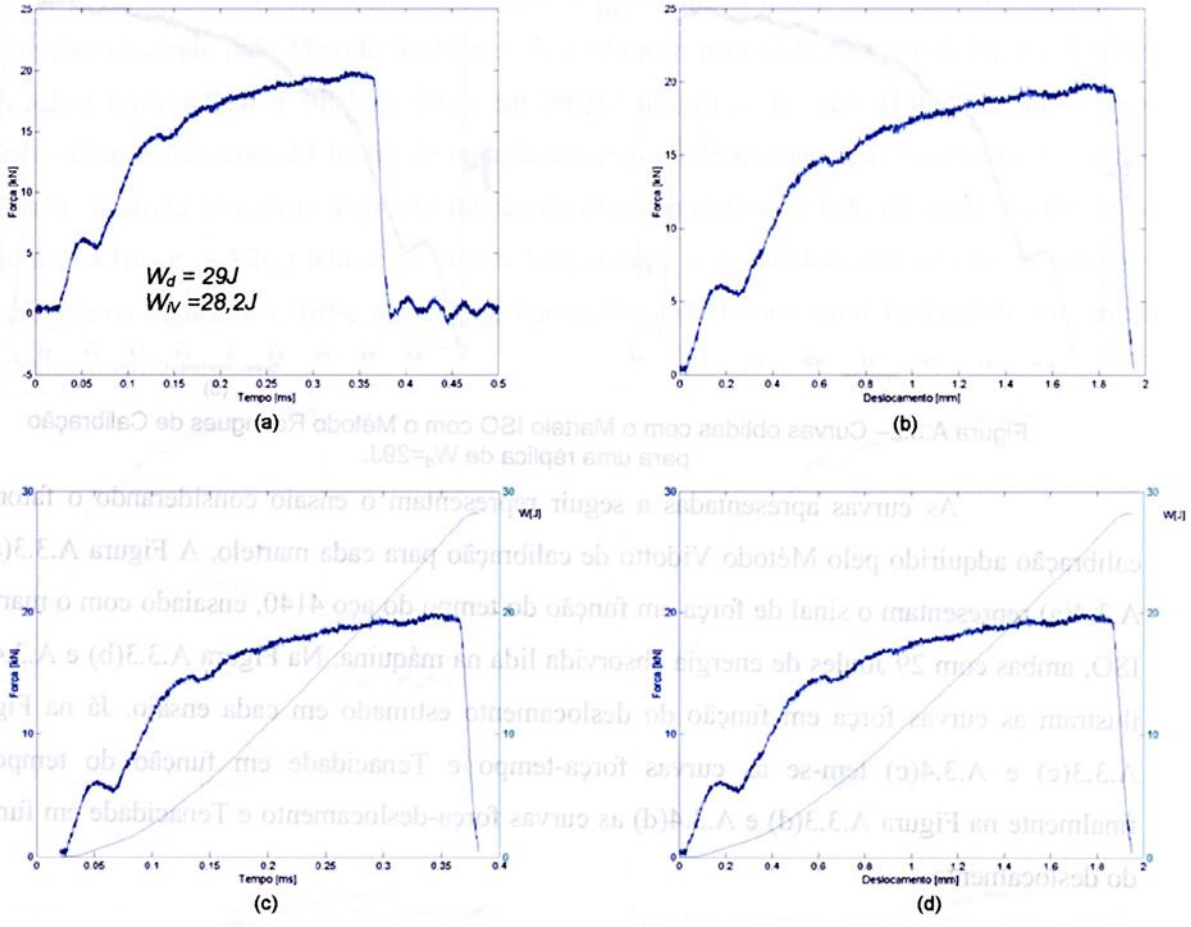
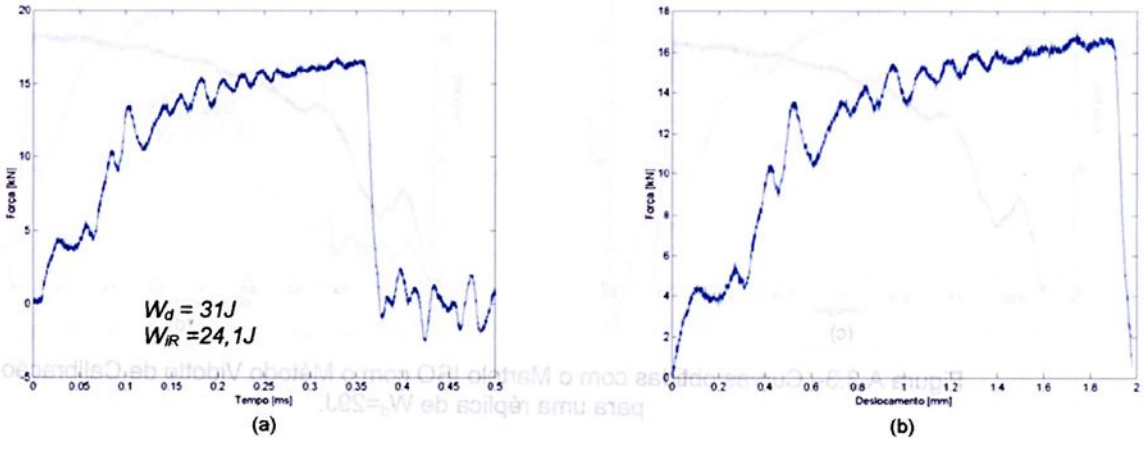


Figura A.3.4– Curvas obtidas com o Martelo ISO com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de W_d=29J.

As curvas apresentadas a seguir representam o ensaio considerando o fator de calibração adquirido pelo Método Rodrigues de calibração para cada martelo. A Figura A.3.5(a) e A.3.6(a) representam o sinal de força em função do tempo do aço 4140, ensaiado com o martelo GC3M, com 31 e 32 Joules de energia absorvida lida na máquina respectivamente. Na Figura A.3.5(b) e A.3.6(b) ilustram as curvas força em função do deslocamento estimado em cada ensaio. Já na Figura A.3.5(c) e A.3.6(c) tem-se as curvas força-tempo e Tenacidade em função do tempo, e finalmente na Figura A.3.5(d) e A.3.6(d) as curvas força-deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento.



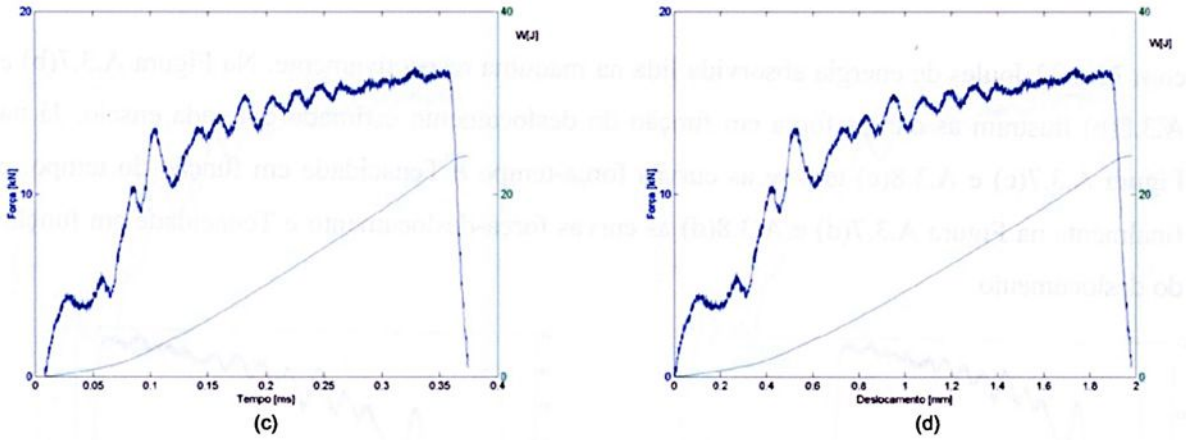


Figura A.3.5 – Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Rodrigues de Calibração para uma réplica de W_d=31J.

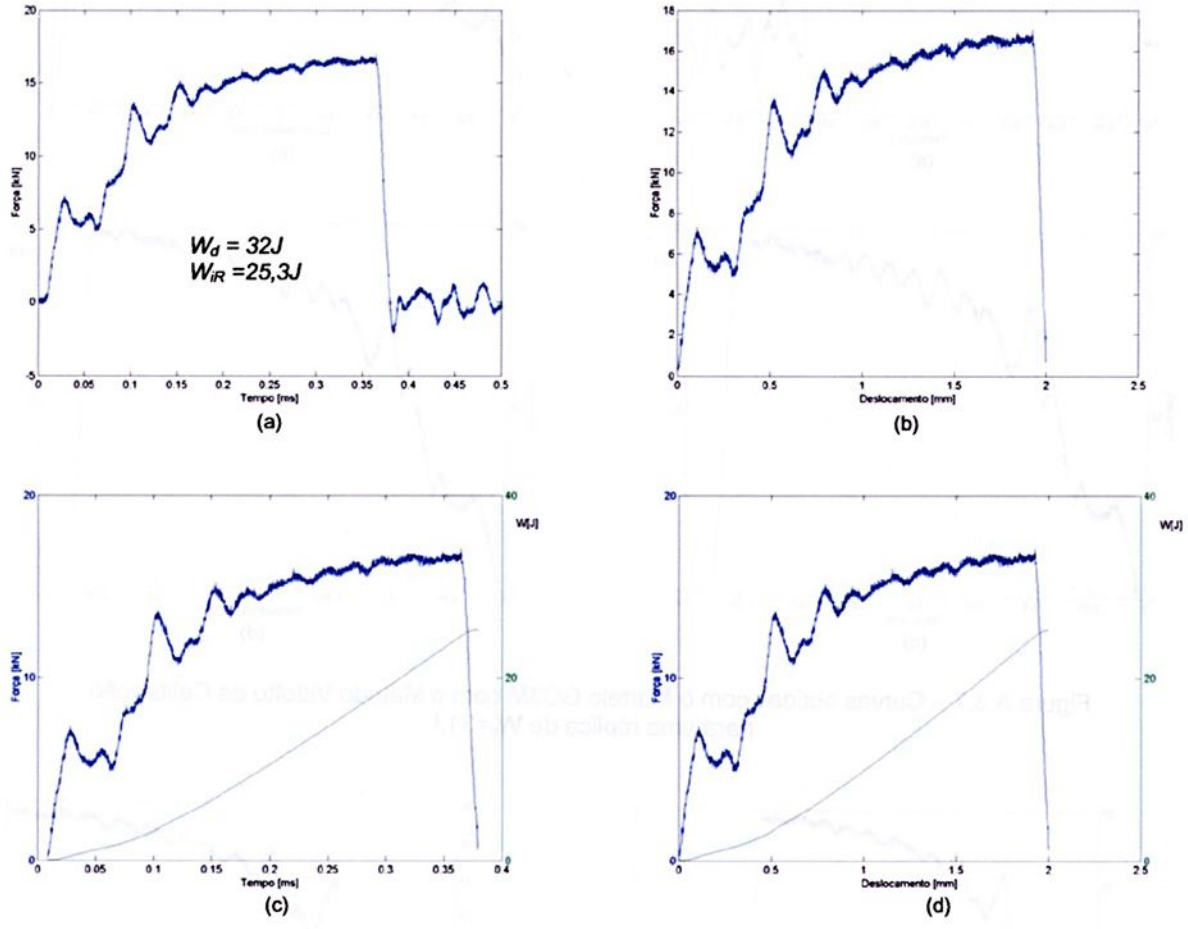


Figura A.3.6 – Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Rodrigues de Calibração para uma réplica de W_d=32J.

As curvas apresentadas a seguir representam o ensaio considerando o fator de calibração adquirido pelo Método Vidotto de calibração para cada martelo. A Figura A.3.7(a) e A.3.8(a) representam o sinal de força em função do tempo do aço 4140, ensaiado com o martelo GC3M,

com 31 e 32 Joules de energia absorvida lida na máquina respectivamente. Na Figura A.3.7(b) e A.3.8(b) ilustram as curvas força em função do deslocamento estimado em cada ensaio. Já na Figura A.3.7(c) e A.3.8(c) tem-se as curvas força-tempo e Tenacidade em função do tempo, e finalmente na Figura A.3.7(d) e A.3.8(d) as curvas força-deslocamento e Tenacidade em função do deslocamento.

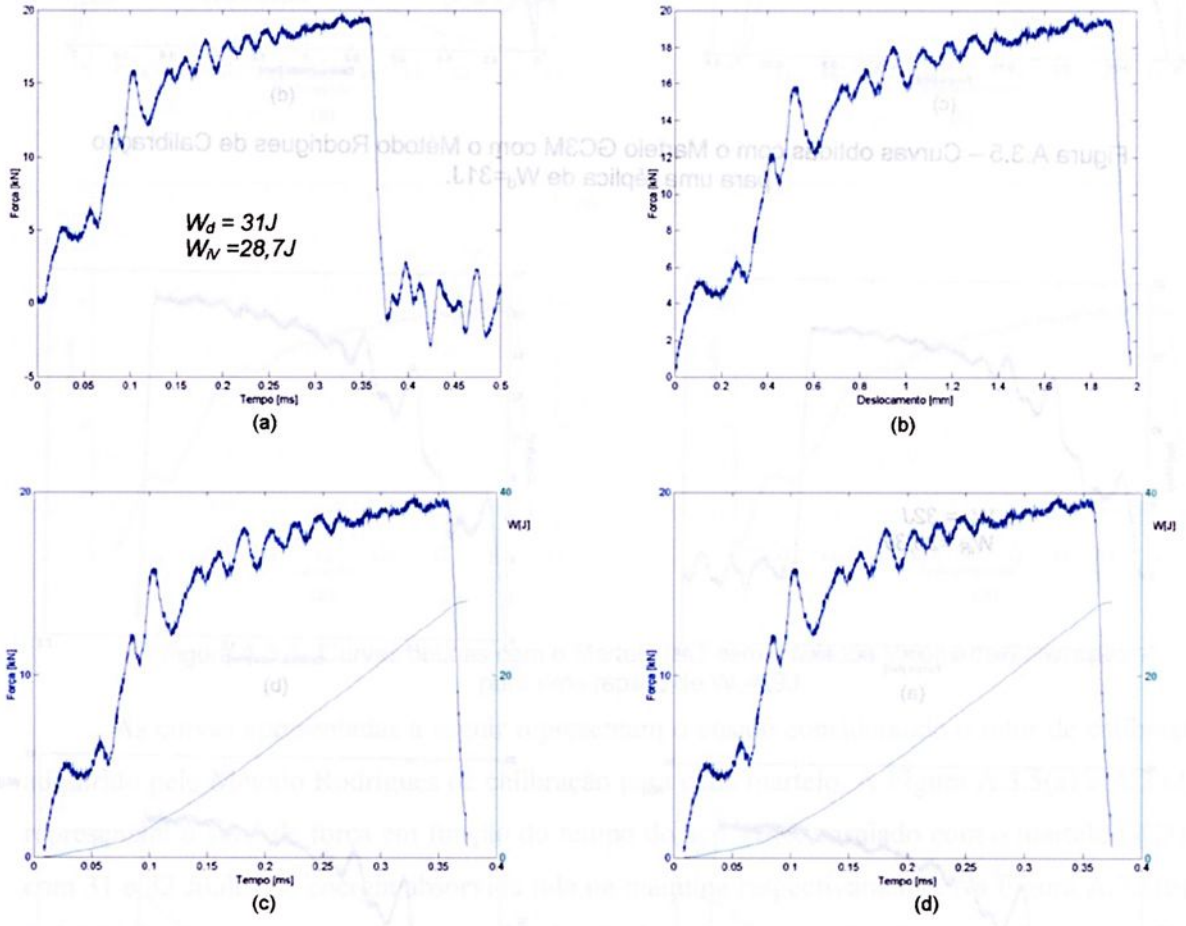
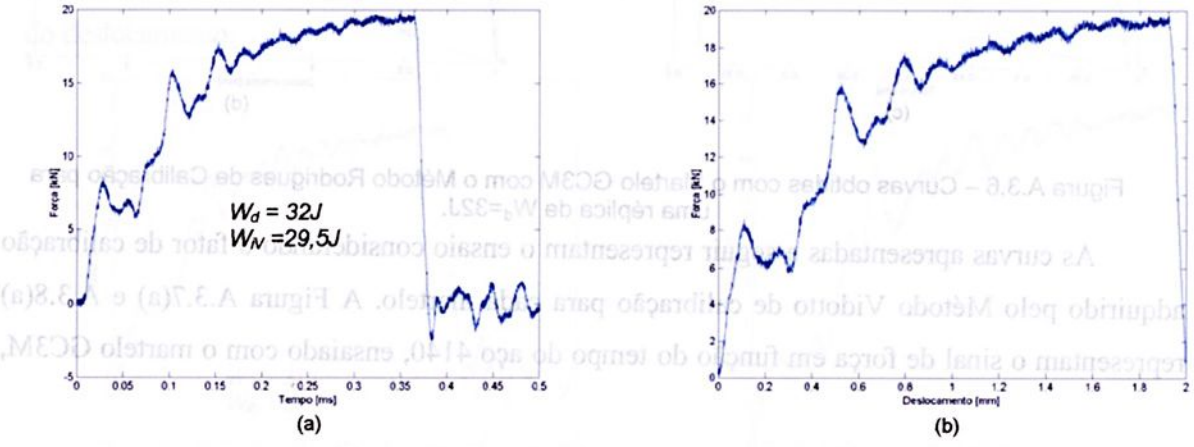


Figura A.3.7 – Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de W_d=31J.



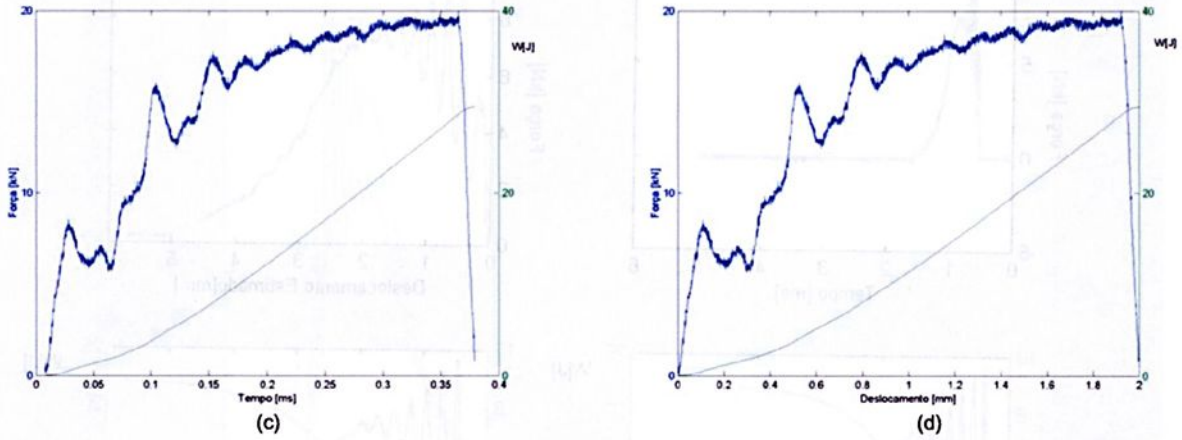


Figura A.3.8 – Curvas obtidas com o Martelo GC3M com o Método Vidotto de Calibração para uma réplica de W_d=32J.

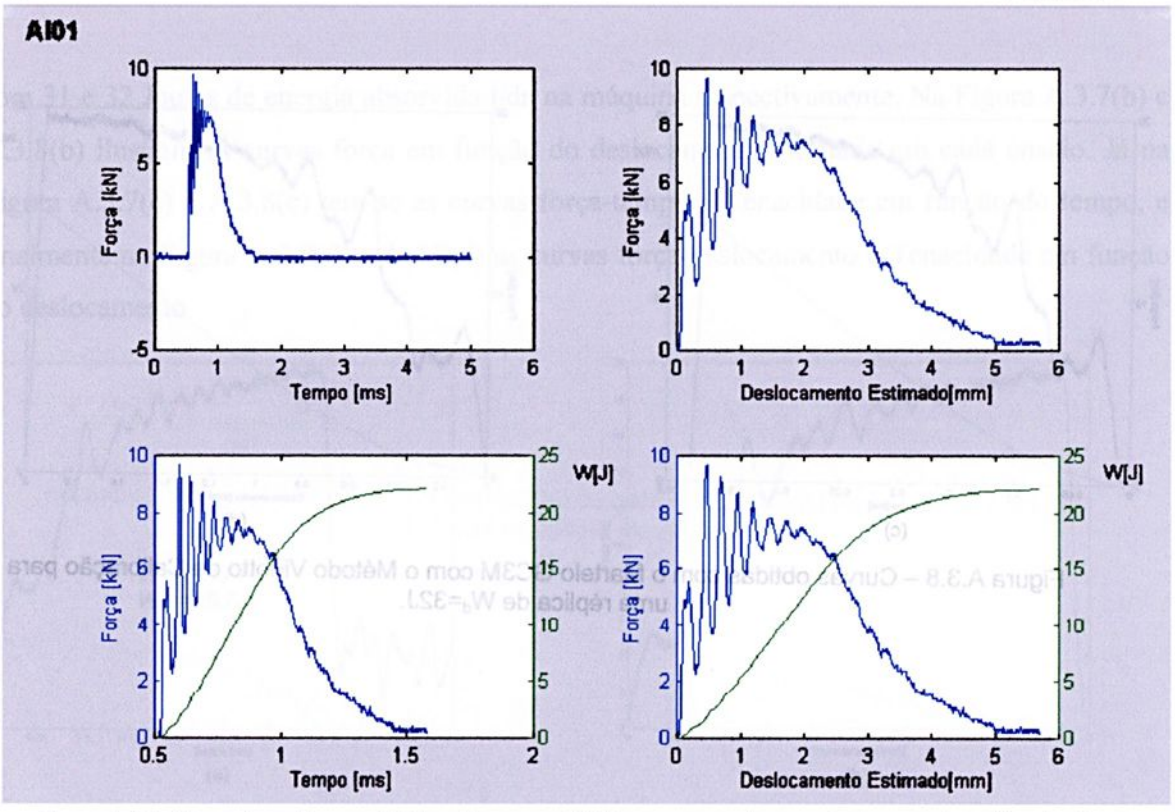


Figura A.4.1- Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=20,5J.

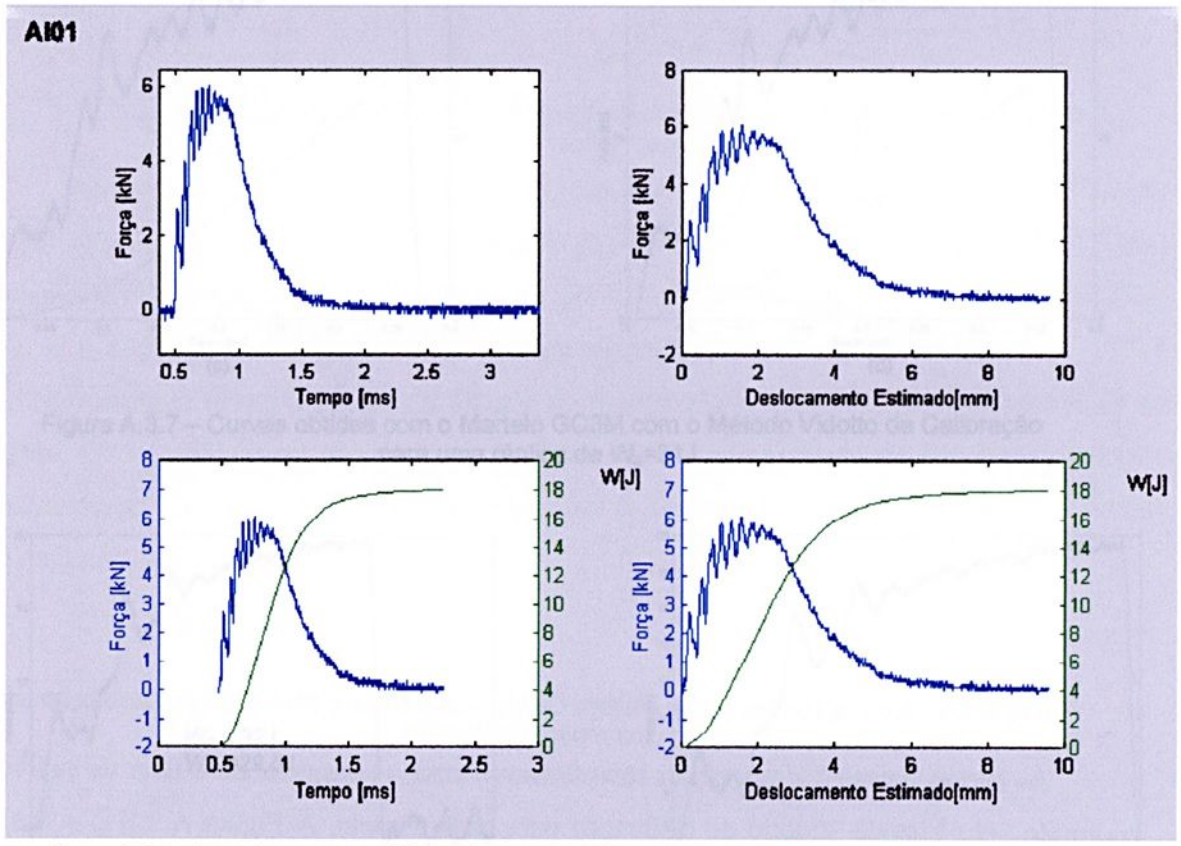


Figura A.4.2- Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=20,5J.

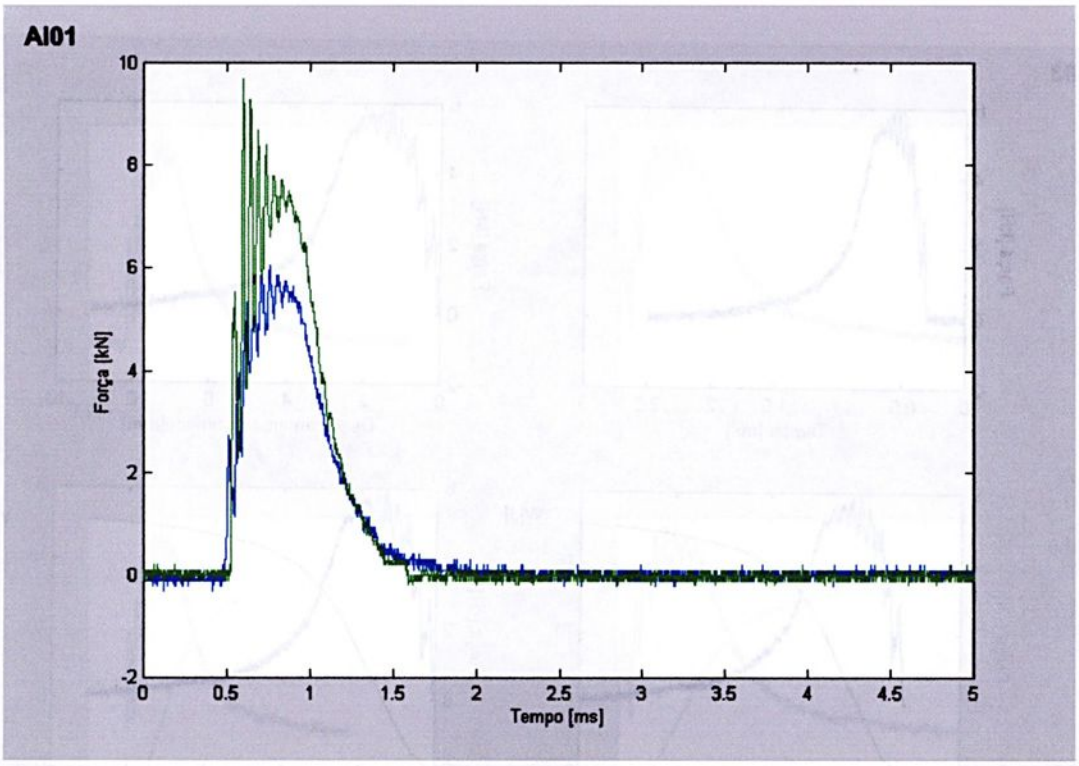


Figura A.4.3 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com W_d=20,5J.

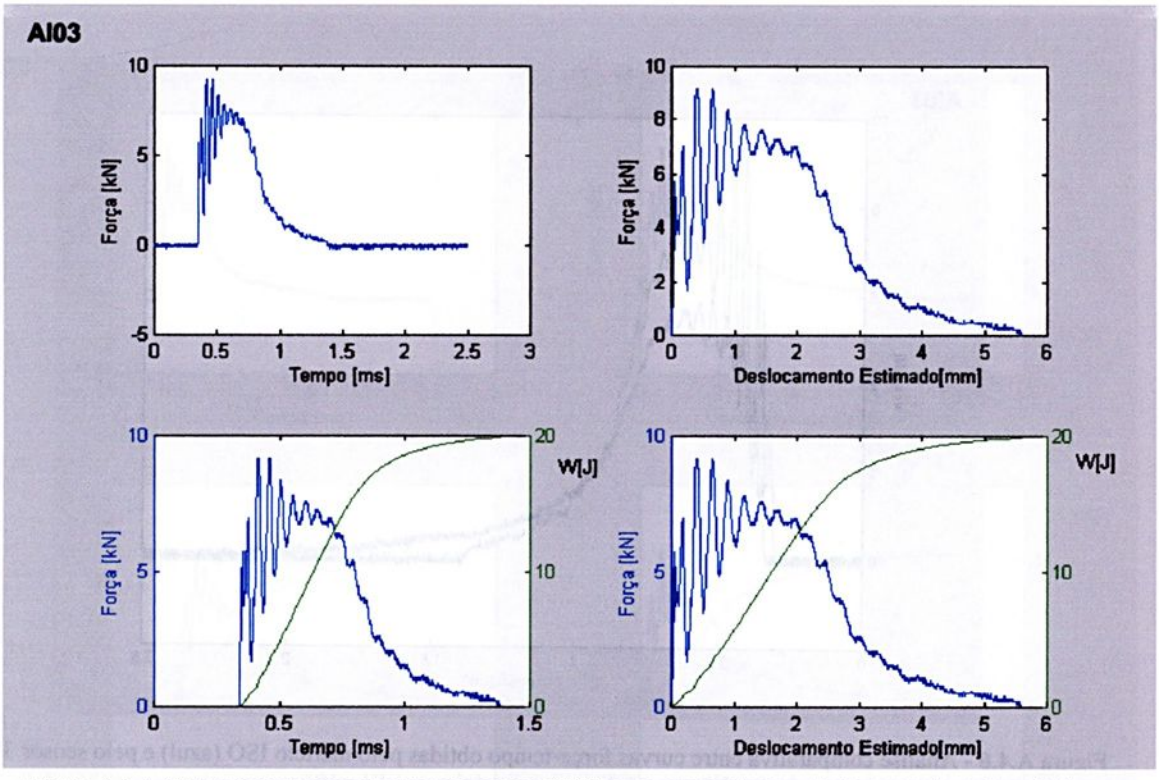


Figura A.4.4- Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=19J.

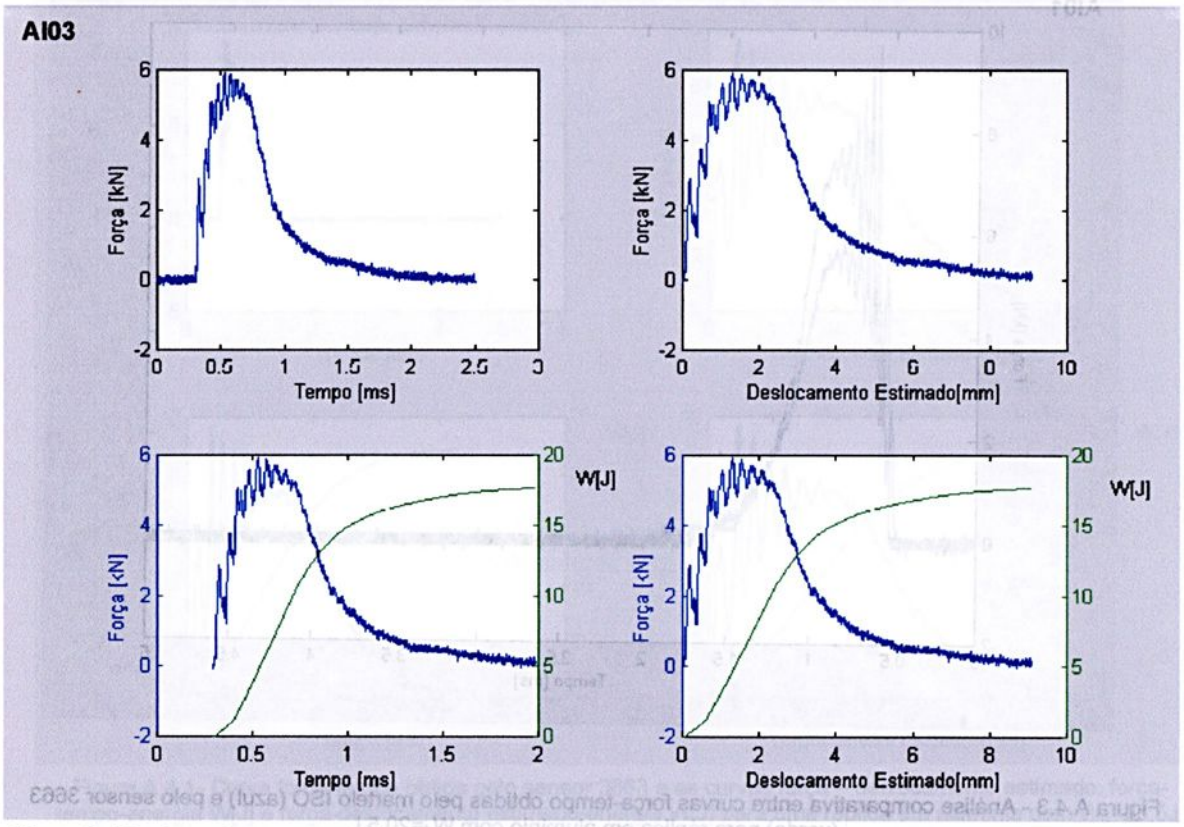


Figura A.4.5 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=19J.

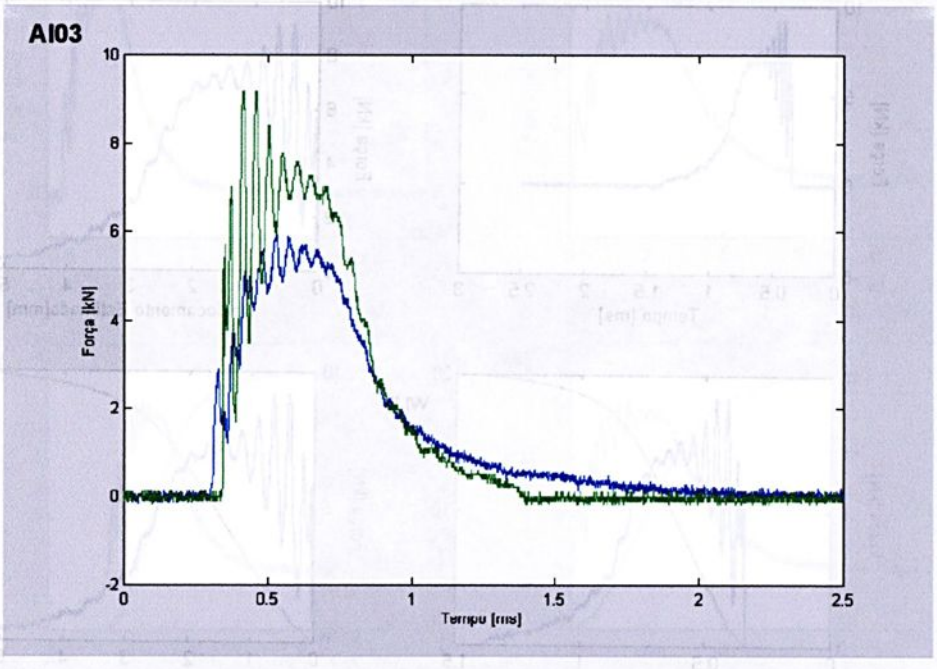


Figura A.4.6 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com W_d=19J.

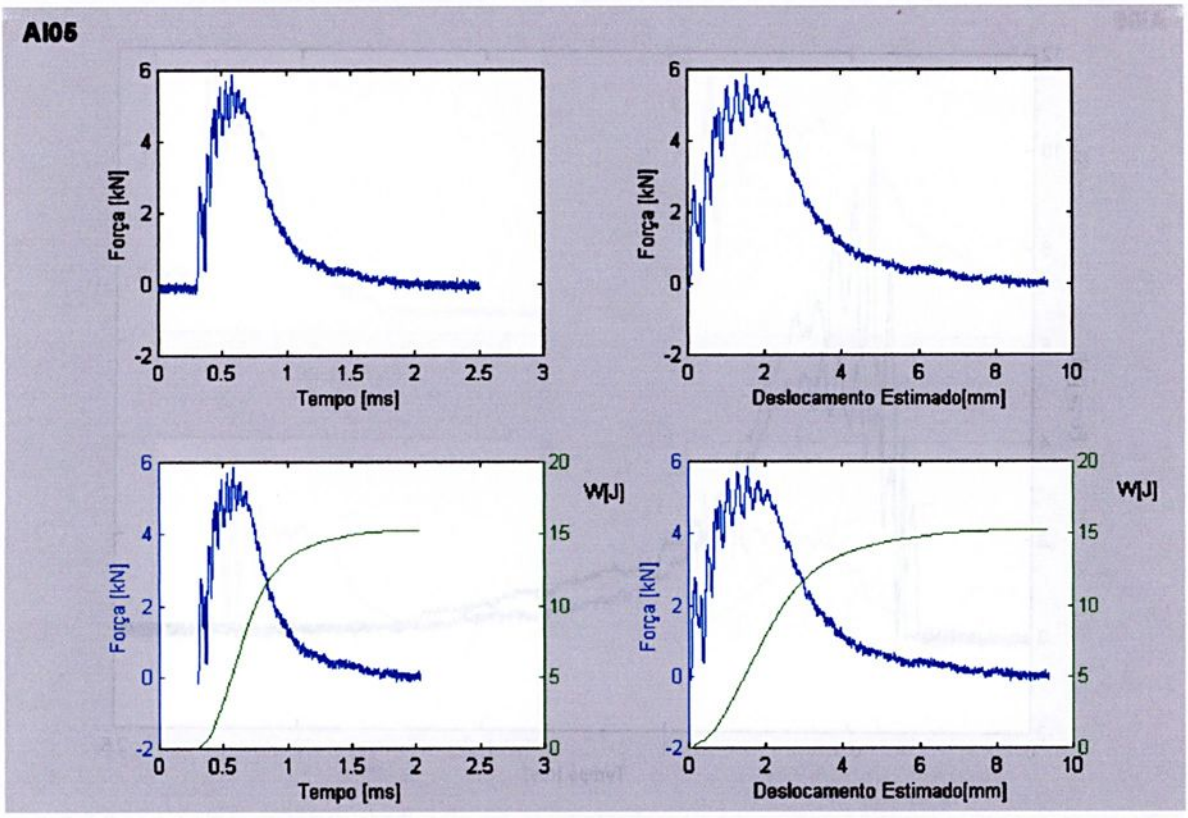


Figura A.4.7- Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=18J.

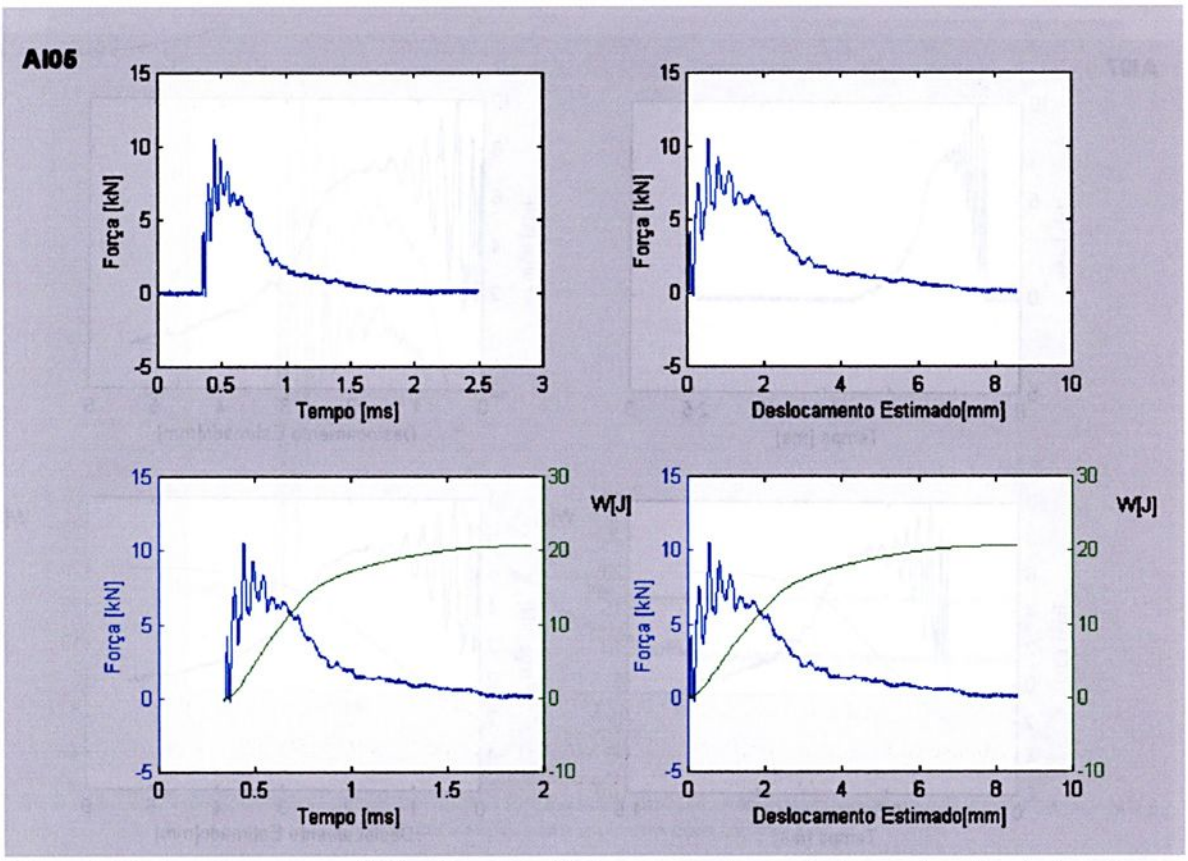


Figura A.4.8 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=18J.

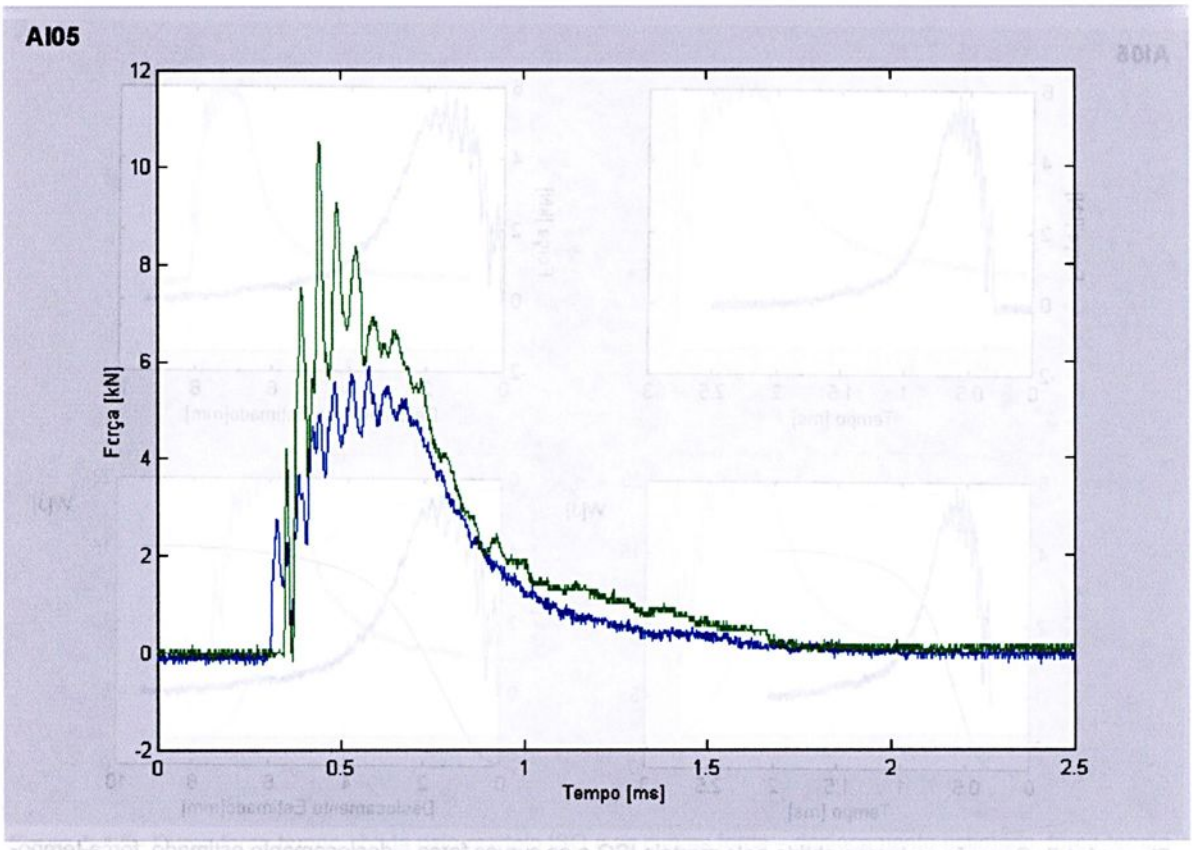


Figura A.4.9 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo martelo ISO (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com W_d=18J.

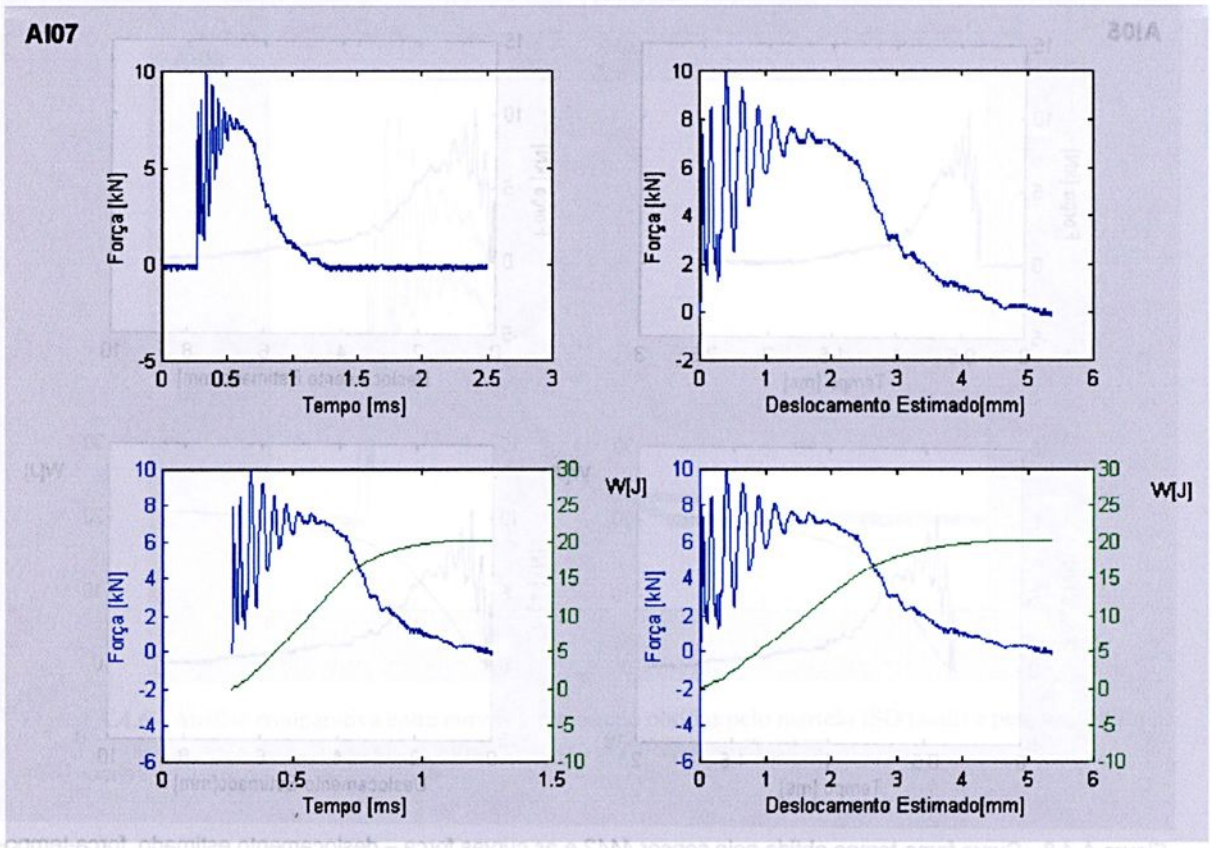


Figura A.4.10- Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=19,5J.

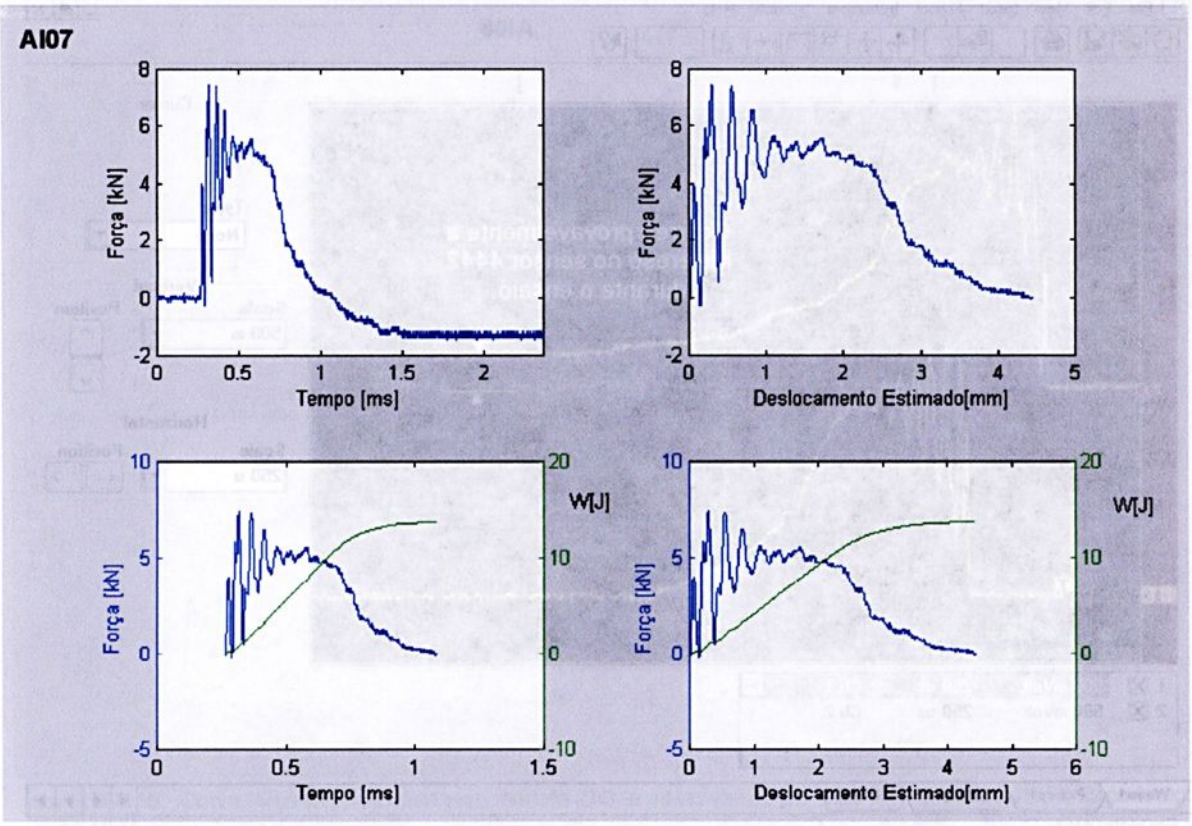


Figura A.4.11- Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=19,5J.

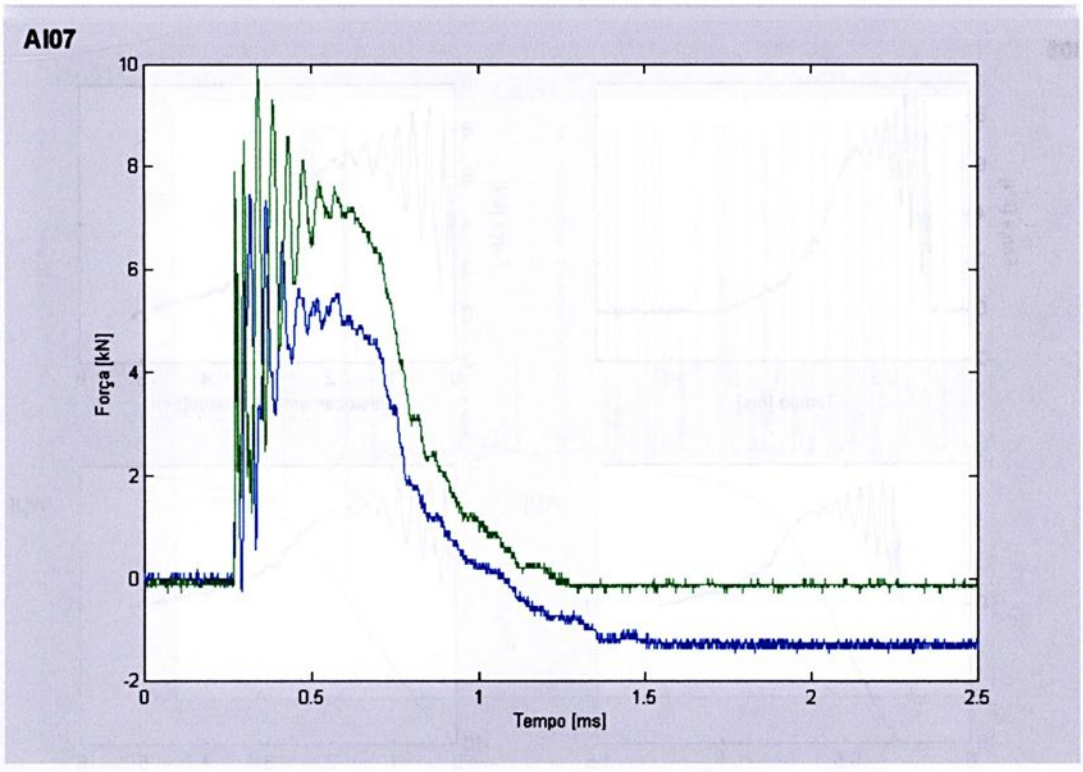


Figura A.4.12 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo sensor 4442 (azul) e pelo sensor 3663 (verde) para réplica em alumínio com W_d=19,5J.

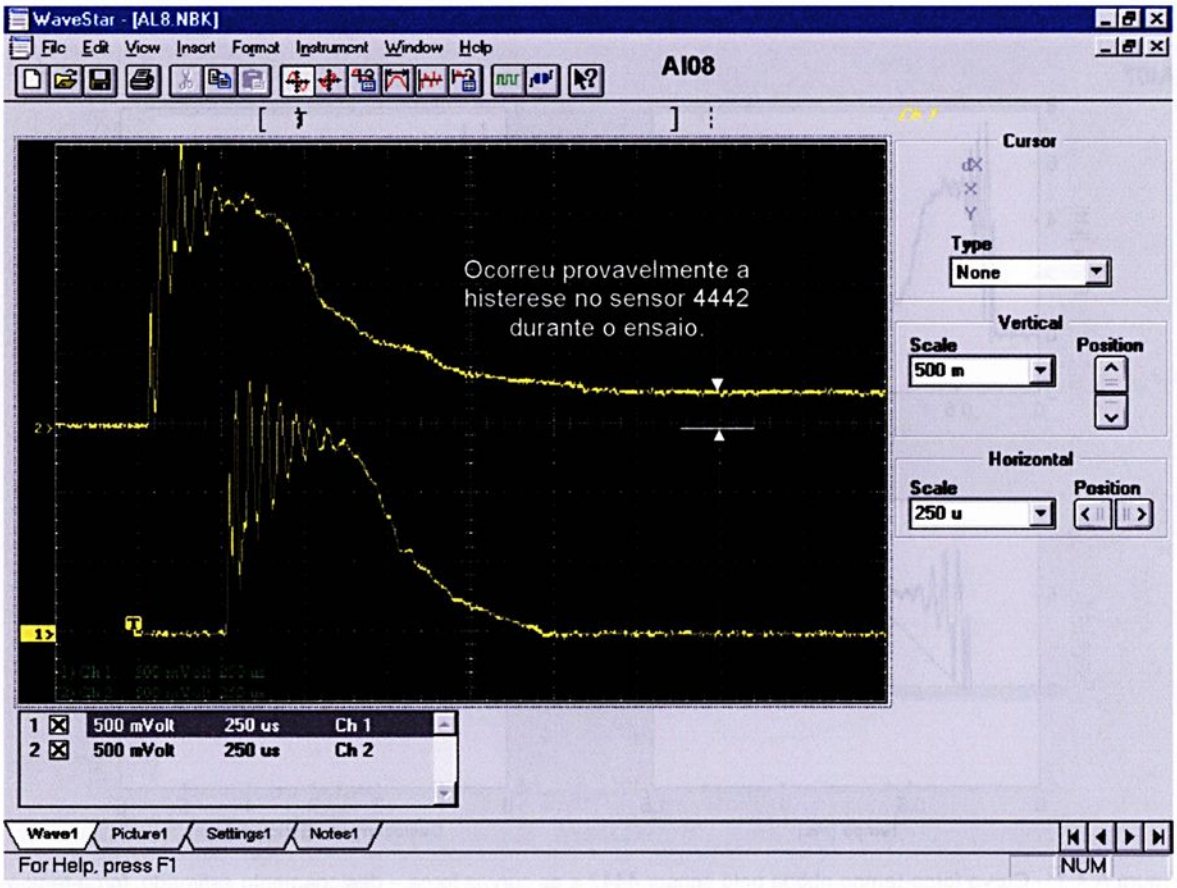


Figura A.4.13 - Análise comparativa entre curvas força-tempo obtidas pelo sensor 4442 (Canal 02) e pelo sensor 3663 (Canal 01) para réplica em alumínio com W_d=18J.

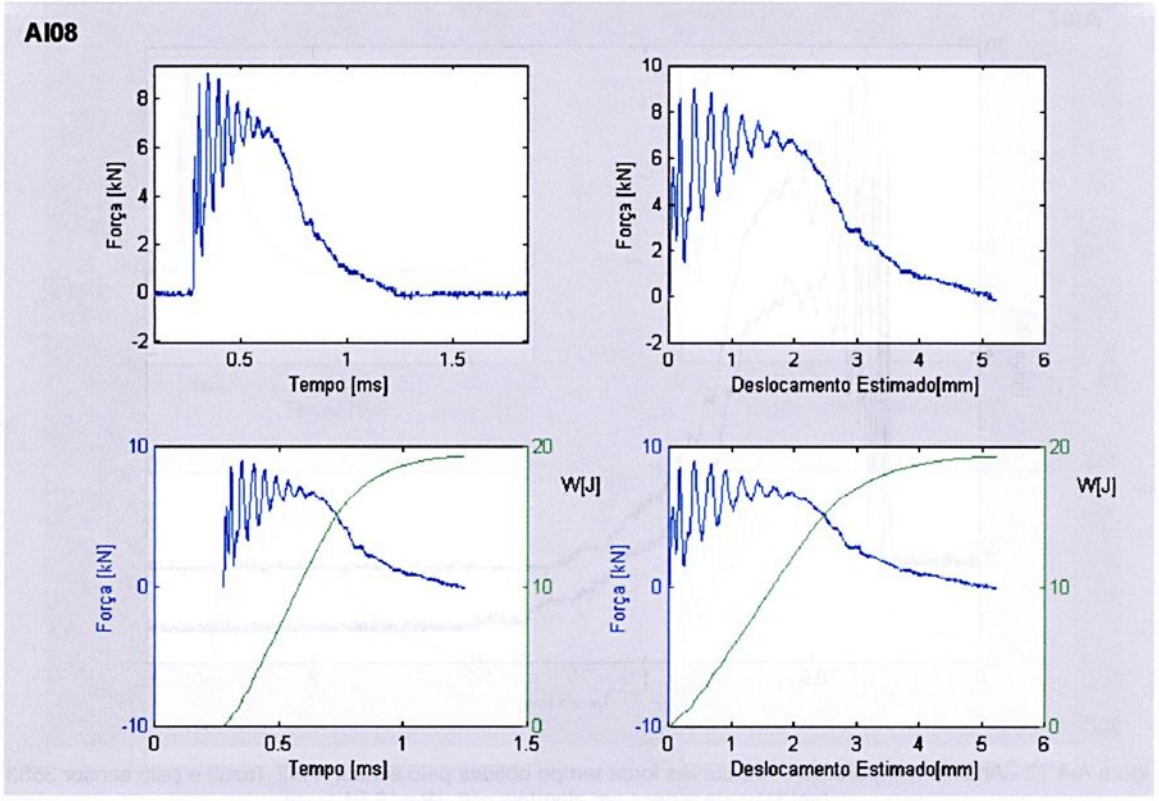


Figura A.4.14- Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em alumínio com W_d=19J.

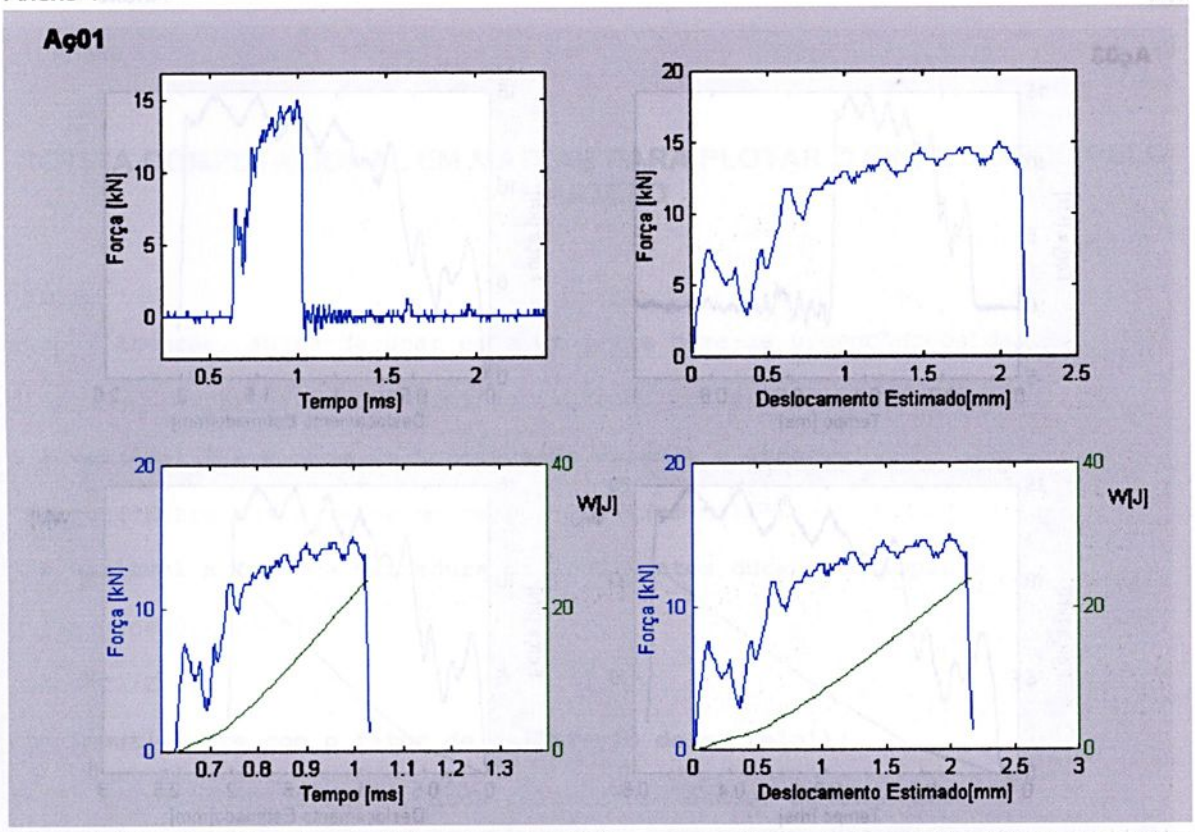


Figura A.4.15 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço ABNT 1040 com W_d=25J.

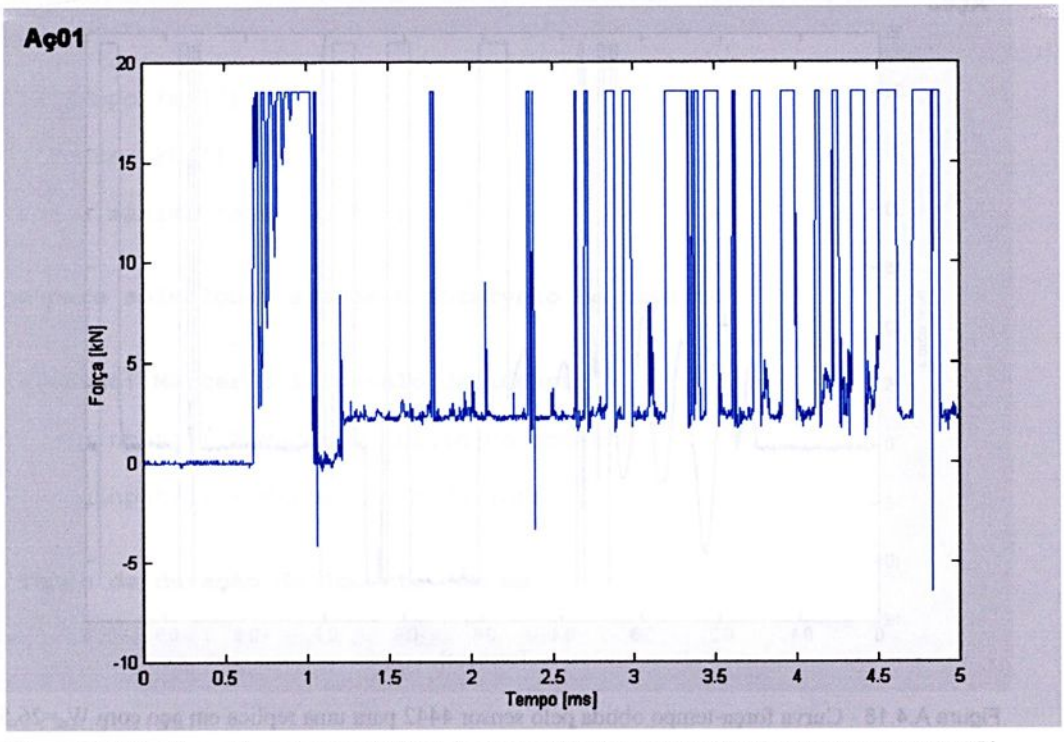


Figura A.4.16 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 3663 para uma réplica em aço com W_d=25J.

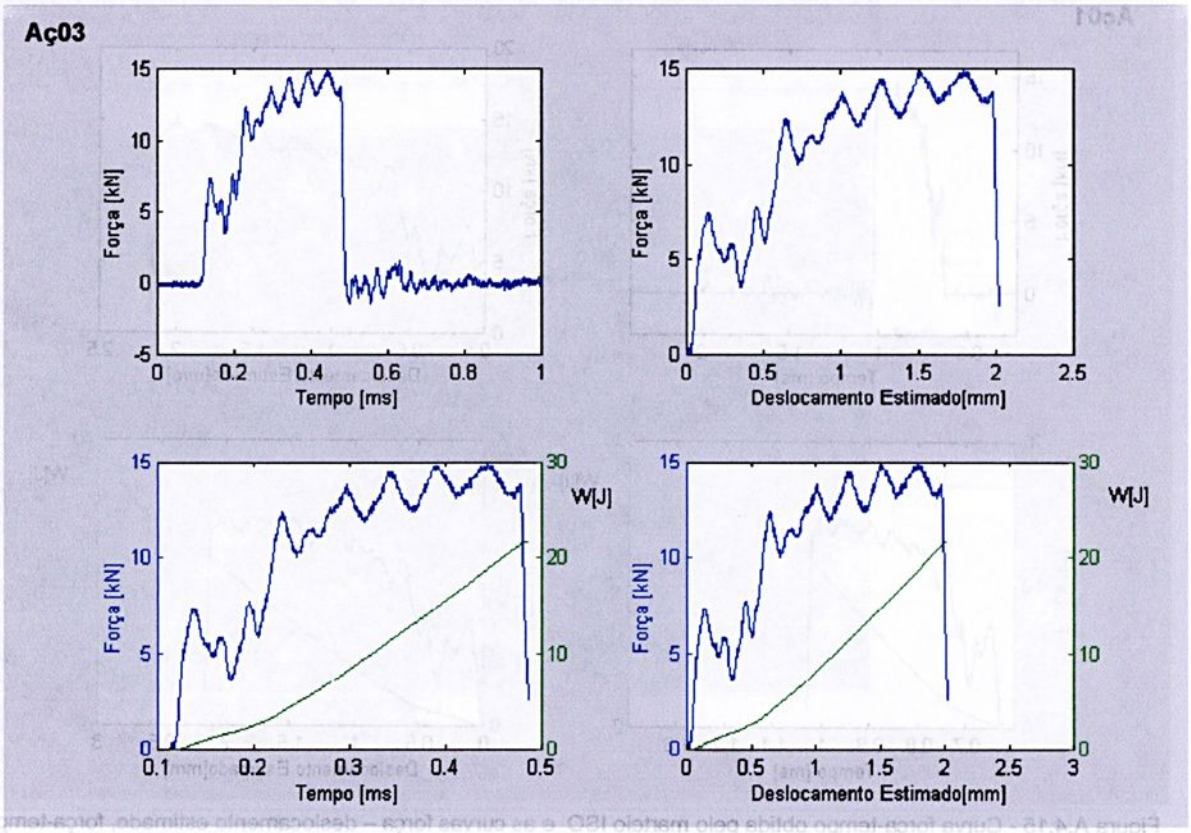


Figura A.4.17 - Curva força-tempo obtida pelo martelo ISO e as curvas força – deslocamento estimado, força-tempo-energia W[J] e força-deslocamento estimado-energia W[J] para uma réplica em aço ABNT 1040 com W_d=26,5J.

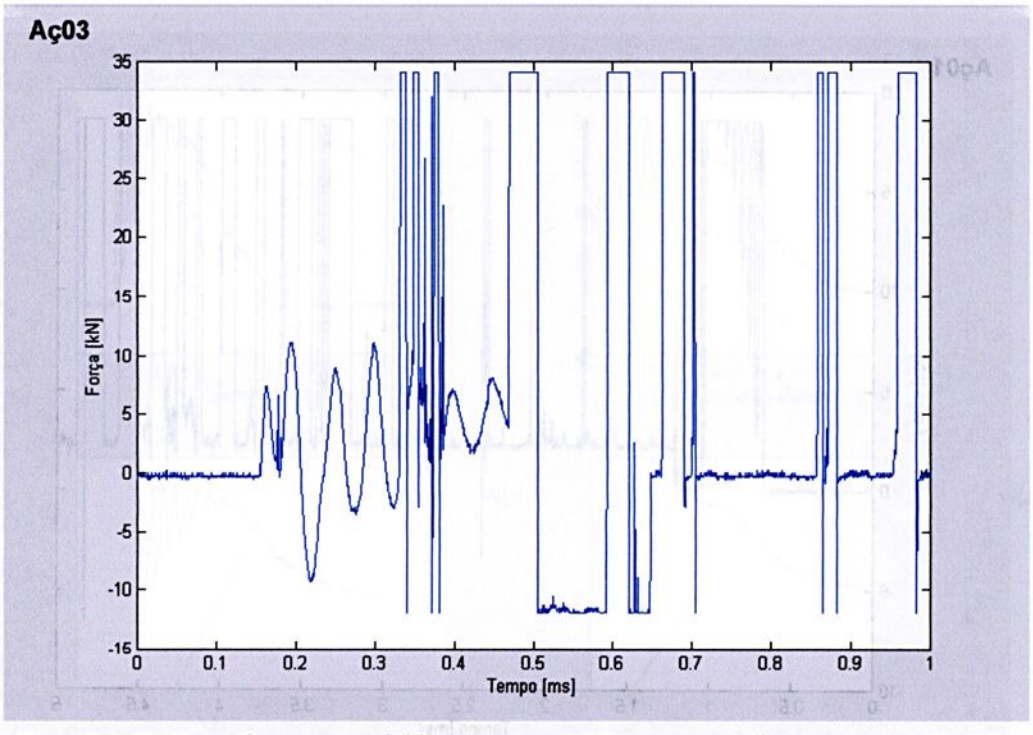


Figura A.4.18 - Curva força-tempo obtida pelo sensor 4442 para uma réplica em aço com W_d=26,5J.

ROTINA COMPUTACIONAL EM MATLAB PARA PLOTAR O SINAL OBTIDO PELO MARTELO

```
clc

disp ('Atenção, antes de usar este programa deve-se preencher os dados')

disp ('    do arquivo .m denominado entrada, onde 1=volts de força ')

% A variável t é a base de tempo usada durante o ensaio

t=input('Entre com o valor do tempo (0 a t(em ms))')

% A variável x faz uma varredura de 2500 pontos durante o impacto

x=linspace(0,t,2500);

passo=t./2500;

ft= input('Entre com o fator de calibração do martelo');

s=1'; % (voltagem de força, dada pelo condicionador de sinais)

s3= s*ft; % (medida de Força (KN))

figure (1)


subplot(2,2,1)

plot(x,s3)

xlabel ('Tempo [ms]')

ylabel('Força [kN]')

disp('Força máxima real, em KN')
zoom on

% Etapa para selecionar apenas o intervalo de impacto

pause
disp('Atenção! Marcar o intervalo de impacto')

[x1 y1] = ginput(1) % Marca o início do impacto
pause
[x2 y2] = ginput(1) % Marca o fim do impacto


disp('Tempo de duração do impacto, em ms')

tempdecontato=x2-x1 % tempo de duração do impacto

j=0;
for i=1:length(s3)
   if  x(i)>=x1 & x(i)<=x2
      j=j+1;
      forca(j)=s3(i);
      dominio(j)=x(i);
```

```
  end
end

% Cálculo das energias

% A função trapz(x,f(x)) calcula a integral de f(x) no dominio x

area= trapz(dominio,forca);

v0=5.5; % Velocidade do martelo ao iniciar o impacto

Massa=19.962; % massa do martelo pendular

o=forca*1000;% força em N

tempo=dominio./1000; % tempo em s

velnumeric(1)=5.45;

H(1)=0;

for k2=2:j
   H(k2)=trapz(tempo(1:k2),o(1:k2));
   velnumeric(k2)= (v0 - (1/Massa).*H(k2));
end

for k2=2:j
   P(k2)=trapz(tempo(1:k2),velnumeric(1:k2));% deslocamento numérico
end

pr=P*1000; % Passa de m para mm

subplot(2,2,2)

plot(pr,forca)

xlabel('Deslocamento Estimado[mm]')

ylabel('Força [kN]')

disp('Energia absorvida calculada numericamente, em Joules')

energia3=trapz(pr,forca)


for k=2:j
   M(k)=trapz(P(1:k),o(1:k));
end

subplot(2,2,3)

plotyy(dominio,forca,dominio,M)

xlabel('Tempo [ms]')

ylabel('Força [kN]')

gtext ('W[J]')

subplot(2,2,4)
```

```
plotyy(pr,forca,pr,M)

xlabel('Deslocamento Estimado[mm]')

ylabel('Força [kN]')

gtext ('W[J]')
```

ROTINA COMPUTACIONAL EM MATLAB PARA PLOTAR O SINAL OBTIDO PELOS SENSORES PIEZOELÉTRICOS

```
clc

disp ('Atenção, antes de usar este programa deve-se preencher os dados')

disp ('    do arquivo .m denominado entrada, onde l=volts de força ')

% A variável t é a base de tempo usada durante o ensaio

t=input('Entre com o valor do tempo (0 a t(em ms))')

% A variável x faz uma varredura de 2500 pontos durante o impacto

x=linspace(0,t,2500);

passo=t./2500;

ft=input('Entre com o fator de calibração do sensor')

%ft=2.469 sensor3663;

%ft=2.271 sensor4442;

s=g'; % (voltagem de força, dada pelo condicionador de sinais)

s3= 2*s*ft; % (medida de Força (KN))

figure (1)

subplot(2,2,1)

plot(x,s3)

xlabel ('Tempo [ms]')

ylabel('Força [kN]')

disp('Força máxima real, em KN')
zoom on

% Etapa para selecionar apenas o intervalo de impacto
pause
disp('Atenção! Marcar o intervalo de impacto')

[x1 y1] = ginput(1) % Marca o início do impacto
```

```
pause
[x2 y2] = ginput(1) % Marca o fim do impacto

disp('Tempo de duração do impacto, em ms')

tempdecontato=x2-x1 % tempo de duração do impacto

j=0;
for i=1:length(s3)
   if  x(i)>=x1 & x(i)<=x2
       j=j+1;
       forca(j)=s3(i);
       dominio(j)=x(i);
   end
end

% Cálculo das energias

% A função trapz(x,f(x)) calcula a integral de f(x) no dominio x

area= trapz(dominio,forca);

v0=5.5; % Velocidade do martelo ao iniciar o impacto

Massa=19.962; % massa do martelo pendular

o=forca*1000;% força em N

tempo=dominio./1000; % tempo em s

velnumeric(1)=5.45;

H(1)=0;

for k2=2:j
   H(k2)=trapz(tempo(1:k2),o(1:k2));
   velnumeric(k2)= (v0 - (1/Massa).*H(k2));
end

for k2=2:j
   P(k2)=trapz(tempo(1:k2),velnumeric(1:k2));% deslocamento numérico
end

pr=P*1000; % Passa de m para mm

subplot(2,2,2)

plot(pr,forca)

xlabel('Deslocamento Estimado[mm]')

ylabel('Força [kN]')

disp('Energia absorvida calculada numericamente, em Joules')

energia3=trapz(pr,forca)


for k=2:j
```

```
   M(k)=trapz(P(1:k),o(1:k));
end

subplot(2,2,3)

plotyy(dominio,forca,dominio,M)

xlabel('Tempo [ms]')

ylabel('Força [kN]')

gtext ('W[J]')

subplot(2,2,4)

plotyy(pr,forca,pr,M)

xlabel('Deslocamento Estimado[mm]')

ylabel('Força [kN]')

gtext ('W[J]')
```

PCB PIEZOTRONICS INC.

CALIBRATION CERTIFICATE

Model: 200B05
Serial #: 3663
Description: Force Sensor
Type: ICP

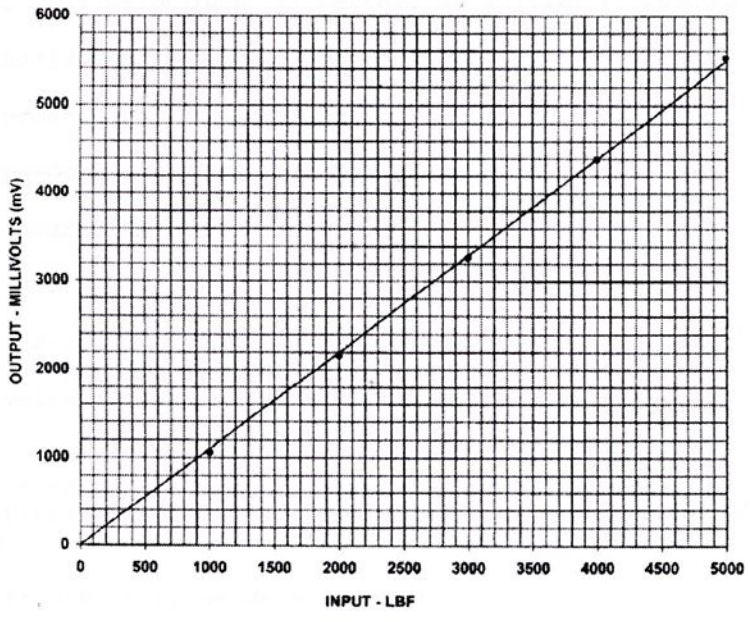
Sensitivity*: 1.098 mV/LBF
Linearity*: 0.79% FS

Date: 12/6/99
By: Gary Redmond, Cal. Tech.
Station: 0-10,000 lb. Load Cell

Cert #: 48473

* Zero based, least-squares straight line.

Notes:
1 Calibration is traceable to NIST and complies with ISO 10012-1 and former MIL-STD-45662A.
2 NIST traceability through project # 822.07/256377
3 This certificate may not be reproduced, except in full, without written approval.



TEST DATA

INPUT (LBF)	OUTPUT (mV)
1000	1058
2000	2161
3000	3271
4000	4394
5000	5518

PCB PIEZOTRONICS, INC.
3425 Walden Avenue, Depew NY 14043
Tel: 716-684-0001 Fax: 716-684-0987
Email: sales@pcb.com Web: www.pcb.com

ISO 9001 CERTIFIED

Figura A.1 – Certificado de calibração do sensor piezoelétrico nº 3663.

CALIBRATION CERTIFICATE

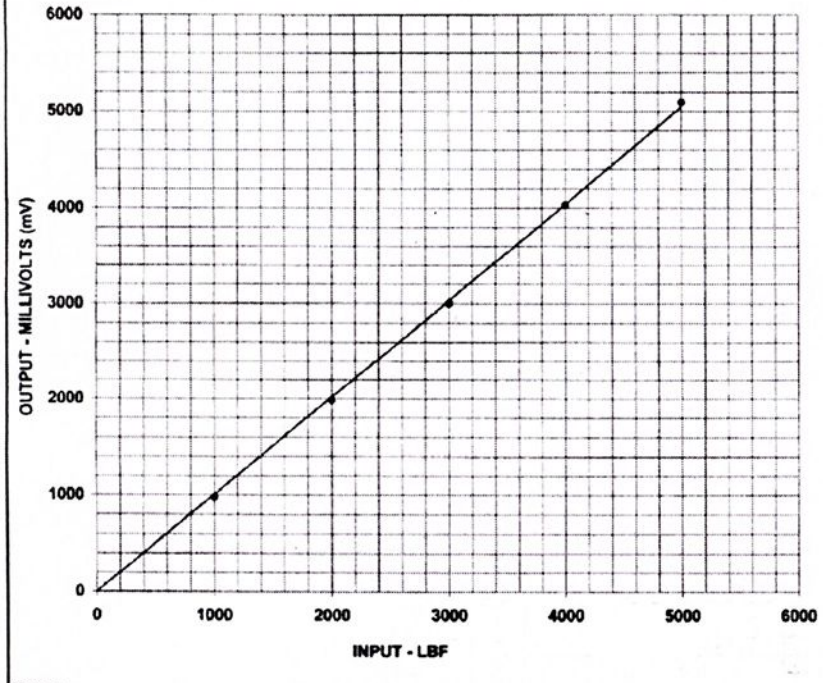
Model:	200B05		
Serial #:	4442	**Date:**	5/21/2002
Description:	Force Sensor	**By:**	Tom Johnston, Cal. Tech.
Type:	ICP	**Station:**	0-10,000 lb. Load Cell (Test Procedure AT501-2)
Sensitivity*:	1.010 mV/LBF	**Temp:**	70 deg F [21 deg C]
	0.2271 mV/N	**Humidity:**	25 %
Linearity*:	0.9% FS	**Cert #:**	120631
Uncertainty:**	+/- 1 %		

Bias: 10.54 VDC

* Zero based, least-squares straight line.

** Measurement uncertainty represented using a coverage factor of k=2 which provides a level of confidence of approximately 95 %.

Condition of Unit:
As Found: Not applicable
As Left: In tolerance, new unit



TEST DATA

INPUT (LBF)	OUTPUT (mV)
1000	980
2000	1985
3000	3001
4000	4031
5000	5096

Notes:
1 Calibration is traceable to NIST and is accredited to ISO 17025 and ANSI/NCSL Z540-1-1994.
2 NIST traceability through PCB control # TA307.
3 This certificate may not be reproduced, except in full, without written approval from PCB Piezotronics, Inc.

ACCREDITED
Cert. No. 1662.01

PCB PIEZOTRONICS™
Tel: 716-684-0001 Fax: 716-684-0987 Email: sales@pcb.com
3425 Walden Avenue, Depew NY 14043

ISO 9001 CERTIFIED

Figura A.2 – Certificado de calibração do sensor piezoelétrico nº 4442.

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