



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PAULO AFONSO FRANZON MANOEL

**TÍTULO: Influência de parâmetros físicos e do processamento digital utilizado
nos sinais oriundos do ensaio Charpy instrumentado**

Ilha Solteira
2014

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Paulo Afonso Franzon Manoel

**Influência de parâmetros físicos e do processamento digital
utilizado nos sinais oriundos do ensaio Charpy
instrumentado**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha
Solteira, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Materiais e
Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ruis Camargo
Tokimatsu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Influência de parâmetros físicos e do processamento digital utilizado nos sinais oriundos do ensaio Charpy instrumentado

AUTOR: PAULO AFONSO FRANZON MANOEL

ORIENTADOR: Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RUIS CAMARGO TOKIMATSU

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ADYLES ARATO JUNIOR

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Profa. Dra. MARIA CRISTINA ADAMI GATTI

Departamento de Engenharia de Materiais / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp

Data da realização: 24 de julho de 2012.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Luiz Carlos, a minha mãe,
Maria Luíza, a minha irmã Ana Carolina,
aos amigos e demais familiares que sempre
me apoiaram e acreditaram em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu por me dar esta valiosa oportunidade, por confiar no meu potencial, pelos inúmeros ensinamentos e pelo grande companheirismo.

Ao Prof. Celso Ryiotsi Sokei e ao Prof. Vicente Afonso Ventrella por me ensinaram a utilizar os equipamentos do laboratório e a fazer ataques químicos, por estarem presentes em meus seminários e pelo companheirismo.

Ao Prof. Dr. João Antônio Pereira e ao Prof. Dr. Claudio Kitano, pois sem as opiniões e comentários expressas por eles em minha banca de estudos especiais meu trabalho não ganharia a qualidade que possui hoje.

Aos professores Dr. Antonio de Pádua Lima Filho, Dr. Miguel Ângelo Menezes, Dr. João Batista Campos Silva, Dr. Marcio Antonio Bazani e Dr. Alessandro Roger Rodrigues pelos ensinamentos, pelos conselhos e pelo companheirismo.

Agradeço ao GPU – DEM – UNESP/campus de Ilha Solteira pela usinagem dos cutelos utilizados neste estudo.

Ao técnico Sr. Carlos José Santana do laboratório de extensometria – Mecânica dos Sólidos – DEM – UNESP/FEIS, por auxiliar em toda a etapa de colagem de extensômetros e zeragem da ponte, sua ajuda foi fundamental neste trabalho.

Ao técnico Sr. Marino Teixeira Caetano por usar grande parte dos corpos de prova utilizados neste estudo.

Aos graduandos em engenharia mecânica Felipe Scheeffe de Souza, por me auxiliar nos ensaios, Humberto Meroto de Luca, por me ajudar na usinagem e no tratamento térmico dos novos cutelos, Renato Pimentel, por me ajudar no ensaio com as barras, Alexandre Chadouteaud, por auxiliar nas micrografias, e aos já graduados Eng. Lucas Bannwart, por me auxiliar nos ensaios e Eng. Bruno Colman, por ter desenhado os novos cutelos.

Aos mestrandos Vicente Gerlin Neto e Claudemir Briguento, por acompanhem os ensaios e pelas sugestões na melhoria da metodologia experimental e pelo companheirismo.

Aos doutorandos Me. Cleiton Lazaro Fazolo de Assis e Me. Danilo Borges por fornecerem amostras e pela confiança em nosso trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pela concessão da bolsa de estudos.

À Pró-Reitoria de Pós Graduação da UNESP – PROPG 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.

RESUMO

Neste estudo foi avaliada a influência dos parâmetros físicos (rigidez do cutelo, comprimento do corpo de prova, geometria do cutelo) sobre a magnitude das interferências presentes nas curvas força vs tempo e força vs deslocamento, também foi estudado o efeito de diversos filtros sobre o sinal coletado. Foram empregados cutelos instrumentados (atuando como células de carga) de diferente rigidez e também um cutelo com geometria distinta em relação aos demais. Foram realizados ensaios com corpos de prova de comprimento iguais a 55mm (em conformidade com a ASTM E-23), 70 mm e 85 mm. Os dados foram tratados com filtros digitais: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e média móvel, os espectros dos sinais filtrados foram comparados aos dos sinais originais. Os resultados indicaram que a rigidez do cutelo possui relação inversa com a magnitude das interferências, por outro lado o comprimento do corpo de prova possui relação direta com o aumento no nível de interferências, o cutelo com geometria diferenciada também exerceu influência sobre a curva força vs deslocamento. A média móvel mostrou-se promissor no tratamento dos dados, desde que seja utilizado um número reduzido de pontos, de modo a não eliminar componentes fundamentais do sinal de interesse. Para os casos analisados o espectro do sinal encontra-se entre 100 Hz e 50 kHz, no entanto a faixa entre 10 kHz e 50 kHz há predomínio das componentes responsáveis pelas interferências.

Palavras-chave: Ensaio Charpy instrumentado. Rigidez do cutelo. Geometria do cutelo. Comprimento do corpo de prova. Média móvel.

ABSTRACT

In this work, was the influence of physical parameters evaluated (stiffness of the striker, length of the specimen, the geometry of the striker) on the magnitude of the interference present in the curves load vs. time and load vs. displacement, the effect of various filters on the signal obtained was also studied. In this study, instrumented strikers (like load cells) of different stiffness and were used a striker which has a different geometry than the others was also tested. Furthermore, the tests were conducted with specimens with length equal to 55 mm (according with ASTM E-23), 70 mm and 85 mm. The data were processed by these digital filters: low pass, high pass, band pass and moving average. The spectrums of the filtered signals were compared with the original ones. The results showed that the stiffness of the striker has an inverse relation with the magnitude of the interference. On the other hand, the length of the specimen has a direct relation with the increased level of interference, the striker with different geometry also exerted influence on the load vs displacement curve. The moving average filter has been a good way out in the treatment of data, but is necessary to use a limited number of points in order not to eliminate essential components of the signal which contains information about the deformation and fracture process. For the materials used in this work, the signal spectrum is between 100 Hz and 50 kHz, but the range between 10 kHz and 50 kHz is predominantly responsible for the interference components.

Key-words: Instrumented Charpy test. Striker stiffness. Striker geometry. Specimen length. Moving average.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	(a) Fratura frágil em um aço doce e (b) fratura dúctil do tipo taça e cone no alumínio.	29
Figura 2 -	Relação inversa entre tenacidade à fratura e resistência em ligas metálicas.	30
Figura 3 -	Estado de tensão em uma unidade de volume de um corpo de prova utilizado no ensaio de tração (à esquerda) e em um corpo de prova utilizado no ensaio de impacto Charpy (à direita).	31
Figura 4 -	Representação esquemática do ensaio de impacto Charpy.	32
Figura 5 -	Corpos de prova Charpy normalizados pela ASTM E-23 (1996).....	34
Figura 6 -	Ilustração apresentando a diferença no apoio do corpo de prova nos ensaios Charpy e Izod.....	34
Figura 7 -	Resposta ao impacto (força vs tempo) para um aço de média resistência mecânica sob diferentes condições de temperatura.	35
Figura 8 -	Pontos de interesse na curva força vs tempo obtida através do ensaio Charpy instrumentado.	36
Figura 9 -	Erro permissível de valores registrados dentro de uma faixa de força nominal.	41
Figura 10 -	Curva característica força-deslocamento classificadas pela norma ISO 14.556.	42
Figura 11 -	Elementos funcionais de um sistema de medição.	46
Figura 12 -	(a) Força externa tracionando o corpo, (b) força comprimindo o corpo e (c) força cisalhante.	49
Figura 13 -	Extensômetros elétricos (a) de fio e (b) em lâmina (foil).....	49
Figura 14 -	Elemento resistivo.	50
Figura 15 -	Ponte de extensômetros.	51
Figura 16 -	Sinal após receber um ganho G proporcionado pelo amplificador.	53
Figura 17 -	Circuito equivalente simplificado para o amplificador operacional.	54
Figura 18 -	(a) Diagrama esquemático do circuito que compõe um amplificador operacional 741, (b) bloco esquemático utilizado para representar um A.O. e (c) identificação dos pinos do CI 741 – amplificador operacional.	55
Figura 19 -	Amplificador de instrumentação.	56

Figura 20 -	Etapas do processamento de sinais analógicos (à esquerda), sinais no domínio do tempo (centro) e respectivas transformadas de Fourier (à direita).....	58
Figura 21 -	Trem de impulsos aplicado ao sinal de entrada (contínuo).	59
Figura 22 -	(a) Sinal de entrada no tempo contínuo, (b) espectro do sinal de entrada, (c) trem de pulsos, (d) espectro do trem de pulsos, (e) sinal auxiliar no tempo contínuo, (f) espectro do sinal auxiliar.	60
Figura 23 -	(a) Espectro do sinal no tempo contínuo $x_a(t)$, espectro do sinal auxiliar $x_i(t)$: (b) $\Omega_s = \Omega_C$, (c) $\Omega_s < \Omega_C$ (ocorre aliasing) e (d) $\Omega_s > \Omega_C$	62
Figura 24 -	(a) Forma direta para filtros digitais FIR e (b) forma alternativa.	64
Figura 25 -	Resposta de módulo ideais para os filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-altas, (c) passa-faixa e (d) rejeita-faixa.	65
Figura 26 -	Realização em forma direta IIR não-canônica.....	67
Figura 27 -	Sinal aleatório.	69
Figura 28 -	Comportamentos frequentemente observados na curva força vs tempo.	73
Figura 29 -	Representação esquemática do ensaio Charpy através de um sistema massa-mola, com detalhe para o cálculo do carregamento distribuído ao longo do comprimento do corpo de prova.....	74
Figura 30 -	Modelagem do sistema martelo e corpo de prova proposto por Sahraoui e Lataillade.	75
Figura 31 -	Oscilações na curva força vs tempo: (a) $K_C/K_B = 1$, (b) $K_C/K_B = 5$ e (c) $K_C/K_B = 10$	76
Figura 32 -	(a) Sistemas massa-mola com 1 e com 2 graus de liberdade e (b) geometria do corpo de prova.	77
Figura 33 -	Curva força vs deslocamento obtida experimentalmente e prevista através da simulação numérica (PMMA, $k_2 = 1.12 \times 10^6$ N/m, $m_2 = 1.74$ g, $m_1 = 1$ kg, $\alpha = 6.9$, $v_0 = 1$ m/s, $a/W = 0,3$).....	80
Figura 34 -	Curvas força vs deslocamento em amostras de diferentes comprimentos, com entalhe-V e com pré-trinca ($a/W=0,3$) obtidas através do ensaio de impacto Charpy instrumentado.	80
Figura 35 -	Método da alteração da taxa de flexibilidade.	81
Figura 36 -	Dimensões dos corpos de prova utilizados neste estudo	84

Figura 37 -	Têmpera: (a) cutelo antes do tratamento térmico, (b) forno a 900°C, (c) cutelo aquecido após permanecer por 3h no forno em um recipiente com grafita e (d) cutelo resfriado em óleo	85
Figura 38 -	Cutelos de (a) menor rigidez, (b) rigidez intermediária e (c) maior rigidez.....	86
Figura 39 -	Cutelos (a) de rigidez intermediária e (b) com nova geometria (GC3M-II)	86
Figura 40 -	Cutelo instrumentado e compensador estático.....	87
Figura 41 -	Arquitetura utilizada na aquisição simultânea de sinais com martelo e corpo de prova instrumentados.	88
Figura 42 -	Curva ganho x frequência do condicionador para um ganho de 100x.	89
Figura 43 -	Compensador estático.....	89
Figura 44 -	Cadeia de medição e máquina de ensaio instrumentada.	90
Figura 45 -	(a), (b) e (c) Montagem experimental para levantar a curva de calibração estática e (d) TMDE	91
Figura 46 -	Curvas de calibração do cutelo de menor rigidez	92
Figura 47 -	Curvas de calibração do cutelo de rigidez intermediária.....	93
Figura 48 -	Curvas de calibração do cutelo de maior rigidez, extensômetros posicionados a 9,8 mm da extremidade do cutelo	93
Figura 49 -	Curvas de calibração do cutelo de maior rigidez, extensômetros posicionados a 23,1 mm da extremidade do cutelo.....	94
Figura 50 -	Curvas de calibração do cutelo de diferente geometria.....	94
Figura 51 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço 1040	96
Figura 52 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço 4340	96
Figura 53 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço 1020	96
Figura 54 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço 1020, zoom no intervalo entre 0 e 1.8 ms	97
Figura 55 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço API X70	97
Figura 56 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço API X70, o intervalo entre 0 e 1.5 ms.....	97
Figura 57 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço 1040, instantes antes de ocorrer o impacto	98
Figura 58 -	Curva força vs tempo, material ensaiado: aço 1040, instantes após a fratura do corpo de prova.....	99
Figura 59 -	Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço 1040.....	100
Figura 60 -	Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço 4340.....	100

Figura 61 -	Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço 1020.....	101
Figura 62 -	Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço API X70.....	101
Figura 63 -	Curva força vs tempo (original), material ensaiado: aço ABNT 4340.....	103
Figura 64 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 100$ Hz	104
Figura 65 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 1$ kHz.....	104
Figura 66 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 10$ kHz	105
Figura 67 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 100$ kHz	105
Figura 68 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 100$ Hz	106
Figura 69 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 1$ kHz	107
Figura 70 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 10$ kHz	107
Figura 71 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 100$ kHz	108
Figura 72 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 100$ Hz e 1 kHz.....	109
Figura 73 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 100$ Hz e 10 kHz.....	109
Figura 74 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 1$ kHz e 10 kHz.....	110
Figura 75 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 1$ kHz e 100 kHz.....	110
Figura 76 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro média-móvel, $M = 15$ pontos	112
Figura 77 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro média-móvel, $M = 55$ pontos	112
Figura 78 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro média-móvel, $M = 85$ pontos	113
Figura 79 -	Curva força vs tempo após tratamento com filtro média-móvel, $M = 155$ pontos	113
Figura 80 -	Resposta em frequência do filtro média móvel em função do número de pontos empregados.....	114
Figura 81 -	(a), (b) e (c) Curva força vs tempo, ensaio realizado utilizando corpo de prova de 55 mm de comprimento	116

Figura 82 -	(a), (b) e (c) Curva força vs tempo, ensaio realizado utilizando corpo de prova de 70 mm de comprimento	117
Figura 83 -	(a), (b) e (c) Curva força vs tempo, ensaio realizado utilizando corpo de prova de 85 mm de comprimento	118
Figura 84 -	Cutelo de menor rigidez: (a) força vs tempo e (b) força vs deslocamento	120
Figura 85 -	Cutelo de rigidez intermediária: (a) força vs tempo e (b) força vs deslocamento	121
Figura 86 -	Cutelo de maior rigidez: (a) força vs tempo e (b) força vs deslocamento	122
Figura 87 -	Cutelo GC3M-II (diferente geometria): (a) força vs tempo e (b) força e energia vs deslocamento	123
Figura 88 -	Cutelo GC3M-II (diferente geometria): (a) força vs tempo e (b) força e energia vs deslocamento	124
Figura 89 -	Cutelo de maior rigidez, força vs tempo, efeito do posicionamento dos extensômetros	125
Figura 90 -	Curva energia vs deslocamento, cutelo de menor rigidez	126
Figura 91 -	Curva energia vs deslocamento, cutelo de rigidez intermediária, cp de 55 mm de comprimento	127
Figura 92 -	Curva energia vs deslocamento, cutelo de rigidez intermediária, corpo de prova de 70 mm de comprimento	127
Figura 93 -	Curva energia vs deslocamento, cutelo de rigidez intermediária, corpo de prova de 85 mm de comprimento	128
Figura 94 -	Curva energia vs deslocamento, cutelo de maior rigidez intermediária, extensômetro posicionado a 9,8 mm da extremidade	128
Figura 95 -	Curva energia vs deslocamento, cutelo de maior rigidez intermediária, extensômetro posicionado a 23,1 mm da extremidade	129
Figura 96 -	Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo de menor rigidez antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos)	130
Figura 97 -	Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo rigidez intermediária antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos)	130
Figura 98 -	Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo rigidez intermediária antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos), corpo de prova com 70 mm de comprimento	131

Figura 99 -	Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo rigidez intermediária antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos), corpo de prova de 85 mm de comprimento	131
Figura 100 -	Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo de maior rigidez antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos)	132
Figura 101 -	Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo de diferente rigidez antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos)	132
Figura 102 -	Curva força vs deslocamento (azul), curva com mesma inclinação da região elástica (vermelha), variação de 5% em relação à reta guia (magenta)	133
Figura 103 -	Ruído de fundo com cadeia de medição ligada à rede elétrica 127V _{AC} 60 Hz	136
Figura 104 -	Ruído de fundo com cadeia de medição ligada a UPS	137
Figura 105 -	Ruído de fundo com cadeia de medição ligada à UPS ligada rede elétrica 127V _{AC} 60 Hz	137
Figura 106 -	Curvas força vs deslocamento: (a) alimentação com UPS e (b) com UPS ligado à rede elétrica	139
Figura 107 -	Cutelo de rigidez intermediária (padrão)	161
Figura 108 -	Cutelo de menor rigidez	162
Figura 109 -	Cutelo de maior rigidez	163
Figura 110 -	Cutelo GC3M – II	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Símbolos, significados e unidades conforme a Norma ISO 14.556 (2000).....	39
Tabela 2 –	Características ideais na frequência e respectivas respostas ao impulso para filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita faixa.....	65
Tabela 3 –	Tipos de filtros e respectivas aplicações.....	68
Tabela 4 –	Especificações dos extensômetros empregados neste estudo	83
Tabela 5 –	Comparativo entre dureza do material, energia global de fratura, força máxima, deslocamento e tempo de fratura	102
Tabela 6 –	Resultados obtidos através do ensaio com cutelo duplamente instrumentado.....	125
Tabela 7 –	Resultados dos ensaios empregando o cutelo de menor rigidez (tipo A)	134
Tabela 8 –	Resultados dos ensaios empregando o cutelo de rigidez intermediária (tipo B) utilizando corpos de prova de 55 mm, 70 mm e 85 mm de comprimento.....	134
Tabela 9 –	Resultados dos ensaios empregando o cutelo de maior rigidez (tipo C).	135
Tabela 10 –	Resultados dos ensaios empregando o cutelo GC3M-II.....	135
Tabela 11 –	Montagem e explicações de circuitos em ponte com extensômetros	157

LISTA DE SÍMBOLOS

Capítulo 3

Símbolo	Significado	Unidade
f_g	Limite da frequência de saída	Hz
F	Força ou carregamento	N
F_a	Força ou carregamento no ponto de parada da trinca	N
F_{gy}	Força ou carregamento no escoamento plástico	N
F_{iu}	Força ou carregamento na iniciação da trinca	N
F_m	Força ou carregamento máximo	N
g_n	Aceleração da gravidade	m/s ²
H	Altura da queda do centro do pêndulo	m
H_i	Altura inicial	m
H_f	Altura final	m
KV	Energia absorvida como definida pela ISO 148-1	J
M	Massa efetiva do pêndulo	Kg
S	Deslocamento ou Deflexão	m
s_a	Deslocamento ou Deflexão no final da trinca	m
s_{gy}	Deslocamento ou Deflexão no escoamento generalizado	m
s_{iu}	Deslocamento ou Deflexão na iniciação da trinca	m
s_m	Deslocamento ou Deflexão na força máxima	m
s_t	Deslocamento ou Deflexão total	m
t	Tempo	s
t_o	Tempo para o início da deformação elástica do CP	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

Capítulo 4

Símbolo	Significado	Unidade
A	Área	m ²
D	Diâmetro	m
ε	Deformação	
G	Ganho	
K	Sensibilidade à deformação	
l, l_i	Comprimento instantâneo	m
l_0	Comprimento inicial	m
Δl	Alongamento	
R	Resistência elétrica	Ω
ΔR	Variação na resistência	Ω
ρ	Resistividade	$\Omega.m$

Capítulo 5

Símbolo	Significado	Unidade
a	Componentes de $1/D(z)$	
b	Componentes de $N(z)$	
E	Operador esperança	
$h[n]$	Resposta ao impulso no tempo discreto	
$H(e^{j\omega})$	Resposta ao impulso no domínio da frequência	
$H(z)$	Resposta ao impulso no domínio de z	
j	Número imaginário ($\sqrt{-1}$)	
M_1, M_2	Número de pontos	
Ω	Frequência	Hz
Ω_C	Largura de faixa do sinal	Hz
Ω_S	Frequência de amostragem	Hz
$p(t)$	Trem de pulsos no domínio do tempo	
$P(j\Omega)$	Trem de pulsos no domínio da frequência	
$p(x)$	Função densidade de probabilidade	
P	Potência média do sinal	
RSR	Relação sinal-ruído	
R_x	Autocorrelação	
S_x	Densidade espectral de potência	

T	Período de amostragem	s
t	Tempo	s
x	Sinal no tempo discreto	
x_a	Sinal de entrada no tempo contínuo	
x_i	Sinal auxiliar	
X_i	Sinal auxiliar no domínio da frequência	
x_k	Série finita	
X_k	Série finita	
$x[n]$	Entrada do filtro no domínio do tempo discreto	
$X(e^{j\omega})$	Entrada do filtro no domínio da frequência	
$X(z)$	Entrada do filtro no domínio de z	
$y[n]$	Saída do filtro no domínio do tempo discreto	
$Y(e^{j\omega})$	Saída do filtro no domínio da frequência	
$Y(z)$	Saída do filtro no domínio de z	
ω	Velocidade angular	rad/s

Capítulo 6

Símbolo	Significado	Unidade
α	Relação entre a rigidez k_1 e rigidez k_2	
n	Frequência natural do sistema	Hz
k_1	Rigidez de contato (cutelo e corpo de prova)	N/m
k_2	Rigidez de contato (corpo de prova e apoio)	N/m
L_S	Carregamento no corpo de prova	N
L_T	Carregamento no cutelo	N
L_A	Carregamento no apoio	N
M_e	Massa equivalente do sistema	kg
M	Relação entre a massa do martelo e a do corpo de prova	
P	Carregamento	N
R_T	Reação do martelo	N
R_A	Reação do apoio	N
S_e	Constante de mola equivalente do sistema	N/m
t	Tempo	s
v_0	Velocidade do martelo	m/s
x	Deslocamento	m

Capítulo 7

Símbolo	Significado	Unidade
a	Comprimento inicial da pré-trinca	m
B	Espessura do corpo de prova	m
C	Coeficiente elástico aparente	N/m
C_{el}	Coeficiente elastico	N/m
$\Delta C/C$	Compliance change rate	
E_i	Energia necessária para iniciação de trinca	J
J_{Id}	Tenacidade à fratura dinâmica do material na presença de trinca	MPa. $\sqrt{m}$
K_{Id}	Tenacidade à fratura dinâmica do material na presença de trinca	MPa. $\sqrt{m}$
M	Momento fletor aplicado	N.m
P_m	Carregamento máximo	N
S	Distância entre os apoios do corpo de prova	m
W	Largura do corpo de prova	m

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Considerações iniciais.....	21
1.2	Objetivos	21
1.3	Justificativa	22
1.4	Estrutura do trabalho.....	22
2	REVISÃO HISTÓRICA	24
3	ENSAIO CHARPY	29
3.1	Tradicional.....	29
3.2	Instrumentado	34
4	NOÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO	45
4.1	Instrumentos de medição	45
4.2	Extensômetro elétrico	47
4.3	O amplificador de instrumentação	53
5	AMOSTRAGEM E PROCESSAMENTO DE SINAIS	57
5.1	Classificação de Sinais.....	57
5.2	Teorema da amostragem	57
5.3	FFT e DFT	62
5.4	Filtros digitais	63
5.5	Autocorrelação e densidade espectral de potência	68
5.6	Ruído.....	71
6	EFEITOS DINÂMICOS SOBRE A CURVA FORÇA VS TEMPO	73
7	ALTERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE E TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA	81
8	MATERIAIS E MÉTODOS.....	83
8.1	Extensômetros utilizados.....	83
8.2	Confecção dos corpos de prova	83
8.3	Confecção dos cutelos	85
8.4	Cadeia de medição.....	87
8.5	Calibração estática	90
9	RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
9.1	Curvas força vs tempo	95
9.2	Uso de filtros digitais	102

9.3	Influência do comprimento do corpo de prova.....	114
9.4	Influência da rigidez do cutelo	119
9.5	Influência da geometria do cutelo	123
9.6	Influência do posicionamento dos extensômetros no cutelo	124
9.7	Influência do tratamento do sinal sobre o cálculo da energia global de fratura	126
9.8	Espectro dos sinais antes e depois do tratamento com a média móvel	129
9.9	Tenacidade à fratura dinâmica (K_{Id})	133
9.10	Relação Sinal Ruído (RSR) e influência da fonte de alimentação.....	136
10	CONCLUSÕES	140
	REFERÊNCIAS	144
	ANEXO A - Balanço de energia referente ao ensaio Charpy	149
	ANEXO B - Variação da resistência em função da deformação.....	150
	ANEXO C - Tensão de saída de uma ponte retificadora em função da deformação	154
	ANEXO D - Possíveis montagens e aplicações de pontes de extensômetros	157
	ANEXO E - Procedimento para colagem de extensômetros	159
	APÊNDICE A - Cutelos utilizados neste estudo	161
	APÊNDICE B - Rotina computacional.....	165

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Este estudo compõe uma das linhas de pesquisa do GC3M – Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais – criado em 1999 no Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP/campus de Ilha Solteira, dentro da qual foram realizados diversos estudos sobre o ensaio de impacto Charpy instrumentado, com o interesse em contribuir para o aprimoramento da metodologia utilizada, de modo a obter um maior volume de informações a respeito dos fenômenos envolvidos de forma confiável.

Entre as diferentes formas de instrumentação da máquina de ensaio empregadas nestes estudos anteriores, destacam-se o uso de extensômetros elétricos, sensores piezelétricos, potenciômetros.

Foram feitos avanços significativos na medição da força e do deslocamento durante o carregamento de impacto. No entanto, ainda é preciso investir na evolução do ensaio, sobretudo na aquisição dos sinais e tratamento dos mesmos, é nesse sentido que o presente estudo deseja fazer uma contribuição para a evolução da metodologia de ensaio.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo:

- a) tratar os sinais obtidos de modo a evidenciar os comportamentos fundamentais para tornar a análise do processo de deformação e fratura mais precisa;
- b) elaborar uma rotina capaz de calcular a energia global de fratura e compará-la ao valor fornecido pelo dial;
- c) avaliar os efeitos causados nos sinais após o tratamento com filtros digitais;
- d) monitorar o processo de fratura e identificar as limitações na metodologia empregada para estimar o valor da tenacidade à fratura dinâmica;
- e) determinar as causas das interferências nos sinais obtidos;

- f) verificar se a cadeia de medição utilizada atende as necessidades mínimas para a realização do ensaio;
- g) avaliar o efeito de variações nos parâmetros físicos do ensaio sobre as curvas força vs tempo e força vs deslocamento.

1.3 Justificativa

A razão para instrumentar uma máquina de ensaio de impacto Charpy é a obtenção da curva força vs deslocamento com igual tem uma gama consideravelmente maior de informações se comparado à máquina tradicional, que simplesmente trata da resiliência do material.

Para que estas informações possam ser obtidas sejam precisas e confiáveis, é necessário que os sinais coletados estejam livres de interferências ou que as principais informações não sejam adulteradas durante o tratamento do sinal, por isso este estudo procura identificar quais práticas podem contribuir para a obtenção de sinais que preservem as principais características do processo de deformação e fratura e identificar o comportamento das interferências nos sinais coletados.

1.4 Estrutura do trabalho

As informações contidas neste estudo estão organizadas da seguinte forma: o capítulo 2 faz uma revisão histórica da instrumentação da máquina de ensaio de Charpy, desde a origem da metodologia até os dias atuais; o capítulo 3 expõe as normas que regem o ensaio Charpy tradicional e o instrumentado; o capítulo 4 traz algumas noções de medição, explicando os elementos presentes nos sistemas de medição, a aplicação de extensômetros elétricos e os princípios de um amplificador de instrumentação; o capítulo 5 faz considerações sobre sinais, sobre o teorema de amostragem de Nyquist, apresenta os filtros digitais FIR e IIR e também expõe quais as fontes de ruído mais comuns; o capítulo 6 expõe algumas metodologias utilizadas para eliminar os efeitos dinâmicos que se sobrepõe ao sinal de interesse; o capítulo 7 apresenta o método da alteração da taxa de flexibilidade proposto por Yamamoto e Kobayashi (1993) utilizado para auxiliar no cálculo da tenacidade à fratura dinâmica; o capítulo 8 enumera os materiais e métodos utilizados neste estudo; o capítulo 9 contém os resultados dos ensaios realizados e respectivos comentários e

discussões; no capítulo 10 são apresentadas as conclusões do presente trabalho e propõe sugestões para trabalhos futuros; o capítulo 11 exhibe as referências que nortearam este estudo e, finalmente, os Anexos de A a E e Apêndices A e B auxiliam no desenvolvimento de ideias e conceitos apresentados ao longo do texto.

2 REVISÃO HISTÓRICA

O ensaio de impacto Charpy, consagrado no meio científico, recebeu este nome devido ao seu idealizador, Georges Augustin Albert Charpy, que viveu entre os anos de 1865 e 1945.

Este ensaio destrutivo permite comparar o comportamento de diferentes materiais quando submetidos a uma elevada taxa de carregamento, ou avaliar o efeito de variações microestruturais, da temperatura, da presença de um concentrador de tensão, ou de todos estes efeitos combinados.

Este é um ensaio pouco dispersivo, uma vez que as variáveis são devidamente controladas, podendo ser utilizado no controle de qualidade, para avaliar um determinado processo de fabricação.

O ensaio de impacto Charpy também possui outras vantagens, como o reduzido tempo de realização do ensaio e reduzidas dimensões dos corpos de prova, quando comparados a outros ensaios destrutivos, como o ensaio de tração, por exemplo.

A instrumentação da máquina de ensaio torna o ensaio mais proveitoso, pois permite monitorar o comportamento da carga no corpo de prova em função do tempo ou deslocamento, além de fornecer uma forma alternativa de obtenção do valor da energia global de fratura e outros parâmetros.

De modo geral a instrumentação da máquina de ensaio e/ou do corpo de prova é realizada através da colagem de extensômetros elétricos, fazendo com que ambos passem a atuar como células de carga.

No âmbito mundial, Ireland (1977) foi um dos pioneiros no estudo sobre a instrumentação do ensaio Charpy. As análises minuciosas realizadas nessa época contribuíram para a escolha dos equipamentos necessários para compor a cadeia de medição.

Böhme e Kalthoff (1982), do Instituto de Materiais de Freiburg/Alemanha, iniciaram estudos a respeito da instrumentação de corpos de prova ao utilizar corpos de prova entalhados construídos de resina epoxy com dimensões maiores que as utilizadas no ensaio Charpy convencional. Os sinais *força vs tempo* foram medidos e comparados por meio de extensômetros elétricos posicionados no topo do martelo de impacto e na base de apoio dos corpos de prova. Kalthoff também fez uso do

ensaio de impacto em um estudo cujo objetivo era a caracterização de compósitos, este trabalho foi publicado em 2004.

Yamamoto e Kobayashi (1993), da Universidade Tecnológica de Toyohashi – Japão, desenvolveram um sistema denominado *Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing – CAI* – pode-se determinar a tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} ou J_{Id} (vide capítulo 7), além das energias obtidas com base nas curvas força - deflexão, oriundas de corpos de prova Charpy-V pré-trincados. O grande avanço deste estudo foi a incorporação de um computador na cadeia de medição.

Foi com esse objetivo que Schmitt et al. (1994) avaliaram a tenacidade a fratura dinâmica de materiais soldados em reatores nucleares através de corpos de prova entalhados e validaram-se os resultados por meio da simulação numérica. Nesse estudo foram colados extensômetros no topo do martelo pendular e nos corpos de prova, próximos ao ponto de apoio na máquina de ensaio.

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 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. Foram efetuadas diversas taxas de carregamento e temperaturas de ensaio no sentido de avaliar o desempenho da instrumentação implementada.

Quinan (1996), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, realizou (também em um trabalho de mestrado) uma análise do ensaio de impacto Charpy instrumentado recorrendo-se a extensômetros elétricos 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.

Perosanz et al. (1998), do Instituto de Tecnologia Nuclear de Madrid – Espanha, analisaram a tenacidade à fratura dinâmica utilizando o ensaio Charpy instrumentado em um aço comum e em outro usado em vasos de pressão de

reatores. Perosanz et. al. também empregaram a segunda lei de Newton para fazer estimativas sobre o deslocamento do martelo pendular (vide capítulo 2).

Böhme et al. (1999), do Instituto de Materiais de Freiburg/Alemanha, avaliaram a dispersão dos resultados de tenacidade à fratura dinâmica e monotônica, medidos em diferentes temperaturas na região de transição de aços ferríticos também utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares.

Poucas instituições de pesquisa no Brasil 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. Em projetos conjuntos com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) geraram-se alguns trabalhos de mestrado, como alguns estudos sobre o comportamento à fratura dinâmica de materiais poliméricos compostos.

No final de 2000 a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP adquiriu, através do Departamento de Engenharia de Materiais, uma máquina de ensaio Charpy instrumentada da marca *Instron Wolpert*[®] que apresenta o cutelo do martelo pendular instrumentado.

Kobayashi et al. (2001) publicaram em 2001 um artigo sobre os progressos realizados no sistema CAI (citado na página 4).

Rodrigues (2001), no desenvolvimento de um trabalho de mestrado, em 2001 instrumentou a máquina de ensaios com sensores piezoelétricos, usados como transdutores de força, os quais foram alojados na base de apoio dos corpos de prova. Os resultados foram comparados com os obtidos através do uso de extensômetros elétricos, fixados no cutelo do martelo pendular, tal como proposto por Delforge (1994). Assim, a máquina de ensaio Charpy convencional tornou-se duplamente instrumentada. Neste trabalho foi realizado um estudo da tenacidade à fratura dinâmica aparente de materiais metálicos e os resultados obtidos mostraram que os sensores piezoelétricos funcionaram como confiáveis transdutores de força para o ensaio em questão.

Em 2001 foi realizada a CCC (Charpy Centenary Conference), na qual Manahan e Stonesifer (2002) apresentaram um estudo sobre a otimização de modelos de martelos (cutelos). Revelaram que o carregamento indicado pelo martelo do ensaio Charpy instrumentado pode ser adversamente afetado por forças

inerciais no martelo e por variações no contato da distribuição de força entre o martelo e corpo de prova.

No mesmo congresso Manahan et al. (2002) publicaram um artigo comparando o valor da energia registrado pelo dial e o calculado pela integração numérica da curva força vs deslocamento, chegaram a conclusão de que a segunda refere-se apenas a energia necessária para deformar e fraturar o corpo de prova, a diferença diz respeito às perdas na máquina de ensaio, logo a utilização de martelos instrumentados constitui um método alternativo de medida de energia, tanto para ensaios utilizando corpos de prova convencionais como para miniaturas.

Os trabalhos de Lorriot et al. (1994, 2002) empregaram um sensor a laser para medir o deslocamento e tentaram modelar a máquina de ensaio e o corpo de prova através de um sistema massa-mola com dois graus de liberdade (vide capítulo 6), em algumas condições o modelo foi capaz de prever o comportamento registrado pela máquina de ensaio.

Tronskar et al. (2002) estimaram os valores da tenacidade à fratura e da resistência à iniciação de trinca através de uma máquina equipada com um interferômetro a laser, neste estudo também foi empregado o método da *compliance ratio*.

Morita et al. (2002) apresentaram alguns problemas relacionados à instrumentação. Percebeu-se que o diminuir demasiadamente a espessura dos corpos de prova os fatores de calibração tendem a cair. Assim, sugeriu que o sistema deve ser calibrado para corpos de prova com diferentes espessuras para que se conheça a acuracidade do sistema.

Tanguy et al. (2002) da *Ecole des Mines de Paris*, propôs uma simulação numérica do ensaio *Charpy-V* no regime dúctil-frágil de transição. O modelo da falha dúctil foi baseado no modelo modificado de Rousselier. A fratura por clivagem foi descrita usando o modelo de Beremin.

No ano seguinte, Kruger (2003) percebeu ao decorrer de seu trabalho de mestrado que a diminuição da rigidez do transdutor de força aumentava sua sensibilidade, porém isto aumentava o efeito das ondas de choque nos sinais coletados e que a posição dos sensores exerce influência sobre os resultados.

Tvergaard e Needleman (2004) utilizaram o método de elementos finitos para descrever o estado de tensões em um corpo de prova soldado quando submetido ao impacto.

Kharchenko et al. (2006) estudaram o efeito da temperatura e do carregamento na energia necessária para iniciar e para propagar a trinca.

Lucon (2008) comparou os valores da energia absorvida, força e deslocamento obtidos entre ensaios instrumentados que empregavam cutelos com diferentes raios de ponta, 2 e 8 mm, ele chegou a resultados muito interessantes, que apontavam que para corpos de prova com as dimensões padrões o valor da força máxima registrada era ligeiramente maior no martelo com raio de 2 mm, mas que a diferença no valor da força máxima entre os dois cutelos a medida que a tenacidade do material aumentava, este cutelo de menor raio também apresentou maior dispersão nos resultados. O dial da máquina não registrou diferenças significativas abaixo de 200 J. De modo geral, os valores da força e do deslocamento são mais elevados nos ensaios realizados com o cutelo com raio de 8 mm.

Baer et al. (2009) também utilizaram o método da *compliance ratio* (vide capítulo 7) para determinar a tenacidade a fratura em corpos de prova de ferro fundido e Ferreño et al. (2010) traçaram a curva de transição dúctil-frágil para materiais utilizados em vasos de pressão em reatores nucleares utilizando máquinas de ensaio Charpy instrumentadas.

Ali et al. (2011) realizaram um estudo sobre a análise dos sinais obtidos no ensaio Charpy instrumentado utilizando o método I-kaz, modelos estatísticos e densidade espectral de potência do sinal coletado. Ao realizar ensaios com aço 1050 e alumínio, notaram que o coeficiente I-kaz e o valor da densidade espectral de potência eram proporcionais ao módulo de elasticidade, que também seria proporcional ao valor da energia absorvida e à amplitude da deformação. Também concluíram que a ductilidade do material é capaz de afetar o tempo de fratura.

Certamente, os exemplos citados correspondem apenas a uma pequena parcela dentre os inúmeros artigos citados sobre o assunto, porém capazes de ilustrar o interesse pelo assunto e os avanços conseguidos nas últimas décadas.

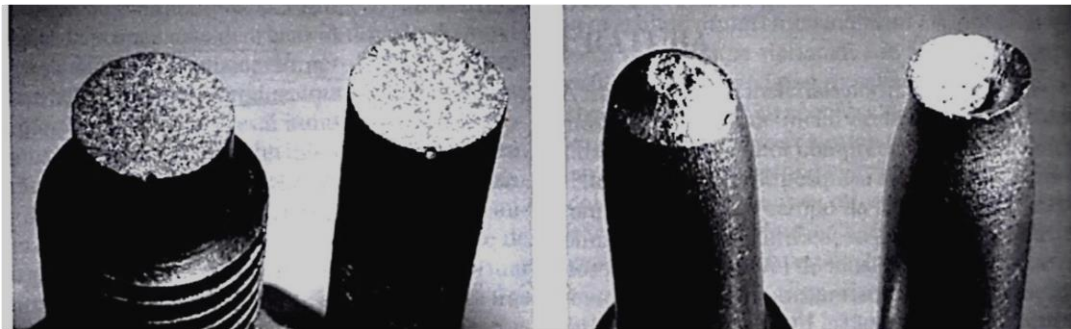
3 ENSAIO CHARPY

3.1 Tradicional

Em 1857 surgiu a primeira máquina de ensaio de impacto, tratava-se de uma máquina de queda de peso. Inicialmente os resultados obtidos eram bastante simples, pois apenas verificavam quais amostras eram levadas à fratura (divisão em duas ou mais partes) e quais não, estas também empregavam amostras sem entalhe. Os materiais que fraturavam eram considerados frágeis.

Posteriormente, as fraturas foram classificadas como dúctil ou frágil. A fratura frágil é aquela que ocorre sem qualquer deformação apreciável e a superfície de fratura tende a ser plana e perpendicular a direção da tensão aplicada. Ao passo que se define fratura dúctil aquela seguida de deformação plástica generalizada, segundo Callister (2002, p. 129-167). A figura 1 apresenta exemplos destes dois comportamentos.¹

Figura 1 - (a) Fratura frágil em um aço doce e (b) fratura dúctil do tipo taça e cone no alumínio.



Fonte: Callister (2002).

Mais do que classificar o modo como se dá a fratura nos materiais, o ensaio de impacto também é capaz de determinar a tenacidade dos materiais.

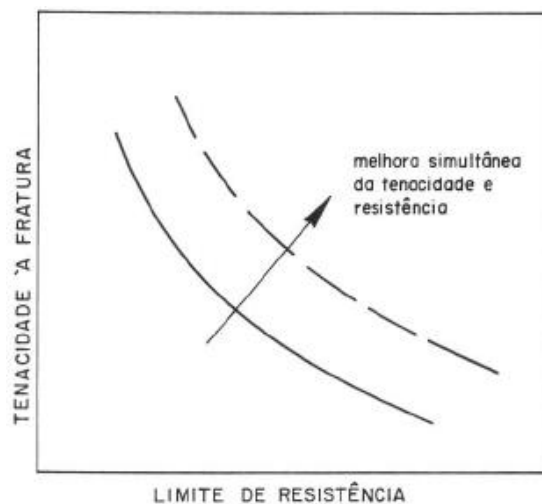
Tenacidade pode ser entendida como sendo a energia absorvida antes e durante o processo de fratura de um determinado material, Callister (2002). A tenacidade de um determinado material está relacionada com sua capacidade de

¹ Embora este estudo aborde questões relacionadas aos ensaios de impacto, as imagens apresentam corpos de prova de um ensaio de tração para exemplificar fratura dúctil e frágil.

deformar-se plasticamente (ductilidade) e de absorver energia enquanto este está se deformando elasticamente (resiliência). Logo, a tenacidade de um material está relacionada à combinação destas duas características, quanto maiores estas se apresentarem, maior será a tenacidade do material.

Porém, ganho em tenacidade geralmente vem acompanhado de uma perda em resistência e vice-versa. Para favorecer as propriedades mecânicas do material é necessário realizar otimizações na liga, então as propriedades avançam no sentido da seta da figura 2.

Figura 2 - Relação inversa entre tenacidade à fratura e resistência em ligas metálicas.



Fonte: Tokimatsu (1995).

Embora seja possível obter o valor de tenacidade de um material através de ensaios convencionais, os valores mais aceitos são aqueles obtidos sob altas taxas de deformação, como num ensaio de impacto, conforme afirmam Tokimatsu e Ferreira (1999).

Isto ocorre porque as taxas de deformação são reduzidas nos ensaios convencionais, como no ensaio de tração. No entanto, as fraturas mais preocupantes são aquelas que ocorrem sob taxas mais elevadas, pois geralmente ocorrem de modo catastrófico e são de difícil controle.

Por este motivo faz-se necessário avaliar a tenacidade dos materiais através de um ensaio de impacto (dinâmico) como o Charpy ou Izod, pois estes são capazes de reproduzir as condições citadas acima. Reed-Hill (1982) afirma que a taxa de

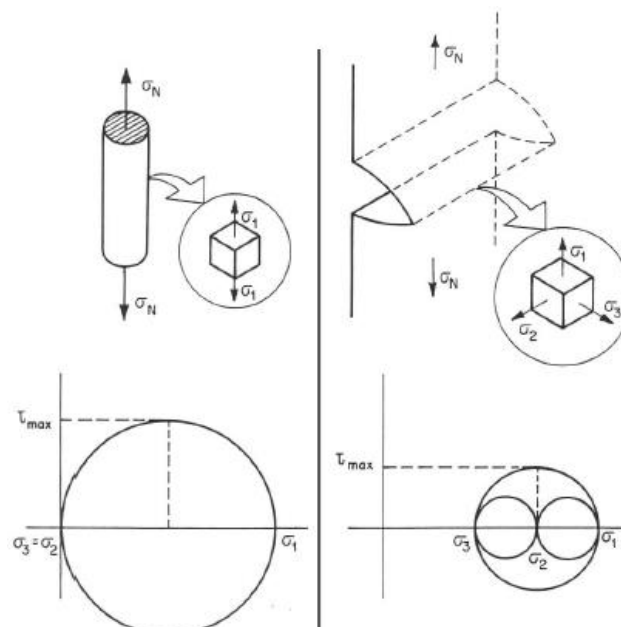
carregamento no ensaio de impacto é aproximadamente 10 milhões de vezes maior do que a de um ensaio de tração convencional.

Além das elevadas taxas de carregamento, também se faz necessário utilizar amostras com entalhe, usadas pela primeira vez por LeChatelier em 1892, pois o entalhe introduz um estado triaxial de tensões nas amostras, que dificulta a ocorrência de deformação plástica, propiciando o crescimento da trinca.

A figura 3 apresenta uma comparação entre o estado de tensão de um elemento de volume de um corpo de prova utilizado no ensaio de tração de um corpo de prova utilizado no ensaio Charpy na presença de um entalhe.

Em relação à realização do ensaio de impacto, o procedimento é bastante simples, consiste em liberar o martelo pendular da máquina de ensaio a partir de uma determinada altura inicial. Então, este colide com o corpo de prova devidamente posicionado na máquina e após a colisão o martelo adquire uma altura final, sempre menor do que a inicial.

Figura 3 - Estado de tensão em uma unidade de volume de um corpo de prova utilizado no ensaio de tração (à esquerda) e em um corpo de prova utilizado no ensaio de impacto Charpy (à direita).



Fonte: Adaptado de Tokimatsu (1995).

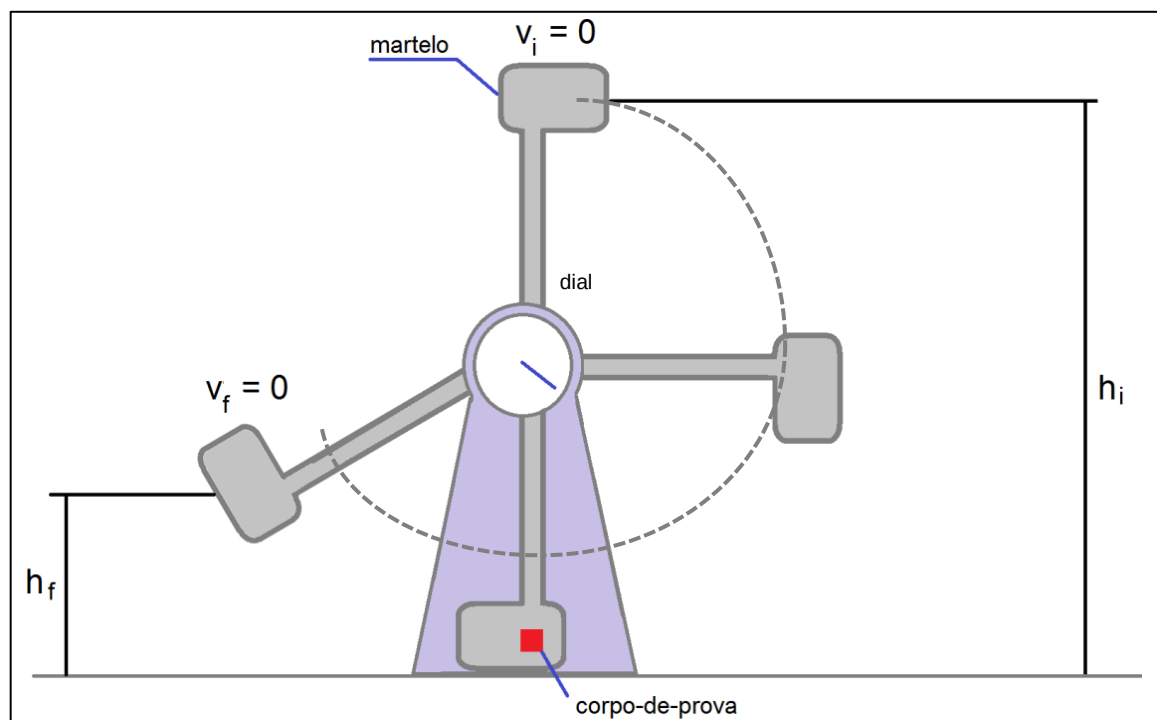
Em relação à realização do ensaio de impacto, o procedimento é bastante simples, consiste em liberar o martelo pendular da máquina de ensaio a partir de

uma determinada altura inicial. Então, este colide com o corpo de prova devidamente posicionado na máquina e após a colisão o martelo adquire uma altura final, sempre menor do que a inicial.

A figura 4 ilustra todo esse processo, através do balanço de energia do sistema obtém-se a equação 1 (vide dedução no Anexo A), que relaciona energia responsável pelo processo de fratura mais perdas com a variação na energia potencial, esta é a relação fica registrada no dial da máquina de ensaio Charpy ao final do ensaio.

Dependendo da aplicação do material é preciso realizar o ensaio com o corpo de prova na temperatura que melhor represente a condição de operação, pois esta influência o comportamento dos materiais submetidos a elevadas taxas de carregamento, de modo que diversos materiais se comportam de forma dúctil a temperatura ambiente e frágil em baixas temperaturas². Não existe uma temperatura exata na qual ocorra a transição, em geral esta ocorre de forma gradual em função da temperatura, para traçá-la são realizados ensaios de impacto empregando um número representativo de corpos de prova em diferentes temperaturas.

Figura 4 - Representação esquemática do ensaio de impacto Charpy.



Fonte: Elaboração do autor.

² Neste estudo todos os ensaios foram realizados a 27 °C.

$$W_T + W_P = m \cdot g_n \cdot (H_f - H_i) \quad (1)$$

Onde,

m = massa do martelo;

g_n = aceleração da gravidade;

H_i = altura inicial do martelo;

H_f = altura final do martelo;

W_T = energia global de fratura;

W_P = energia dissipada (perdas mecânicas, atrito com o ar, etc).

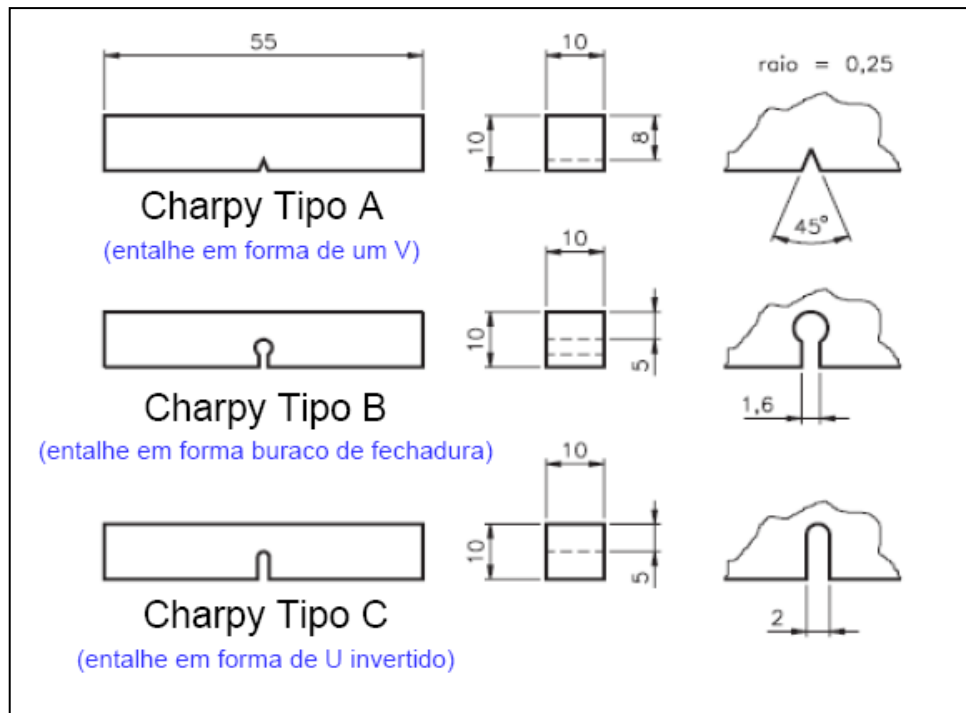
Mas o efeito da temperatura só foi compreendido alguns anos após o fim da II Guerra Mundial, na qual ocorreram diversos incidentes com os navios da série Liberty, segundo Dieter (1988). Por causa disso foram feitas severas críticas ao ensaio Charpy. Posteriormente compreendeu-se que ao realizar os ensaios de impacto com o material usado nos cascos dos navios na faixa de temperatura das águas geladas do Atlântico Norte este se apresentava pouco tenaz.

Enquanto a credibilidade do ensaio de impacto Charpy era recobrada uma nova metodologia de projeto que substituísse a Resistência dos Materiais começou a ser elaborada, atualmente conhecida como Mecânica da Fratura, porém ambas são empregadas atualmente, cada uma dentro do seu raio de aplicações. Após este período, o ensaio Charpy voltou a ter o devido reconhecimento e é considerado um ensaio clássico atualmente (2012).

Além da temperatura, é preciso considerar também o efeito causado pelo entalhe, pois este introduz um estado triaxial de tensões, o que permite avaliar o comportamento do material na presença de um concentrador de tensão aliado a altas taxas de carregamento. É usual realizar ensaios de impacto com materiais metálicos empregando corpos de prova com entalhes. Conforme a ASTM E-23 (1996) são permitidos três diferentes tipos de entalhe nos corpos de prova utilizados, vide figura 5 extraída da norma em questão.

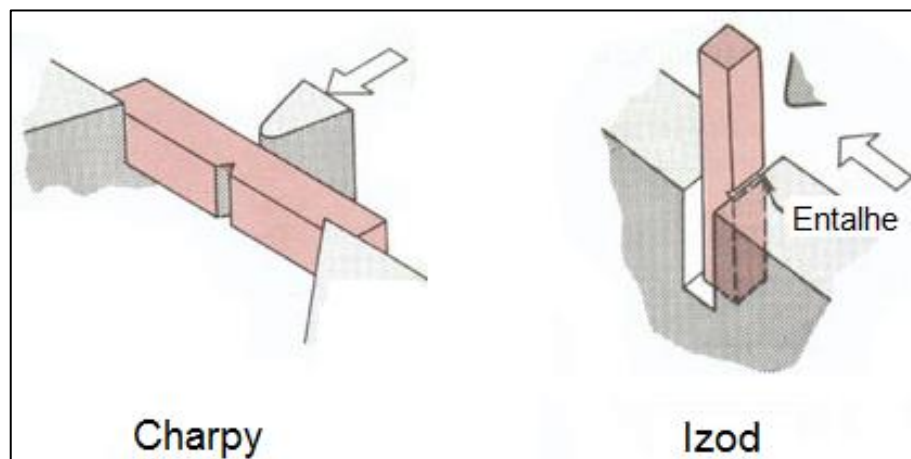
Também é válido apresentar a diferença entre os ensaios de impacto Charpy e Izod, que consiste na forma como o corpo de prova é apoiado, vide figura 6.

Figura 5 - Corpos de prova Charpy normalizados pela ASTM E-23 (1996).



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

Figura 6 - Ilustração apresentando a diferença no apoio do corpo de prova nos ensaios Charpy e Izod.



Fonte: Callister (2002).

3.2 Instrumentado

A máquina de ensaio Charpy tradicional possui um amplo campo de aplicações, todavia também encontra certas limitações. Por exemplo, o valor da

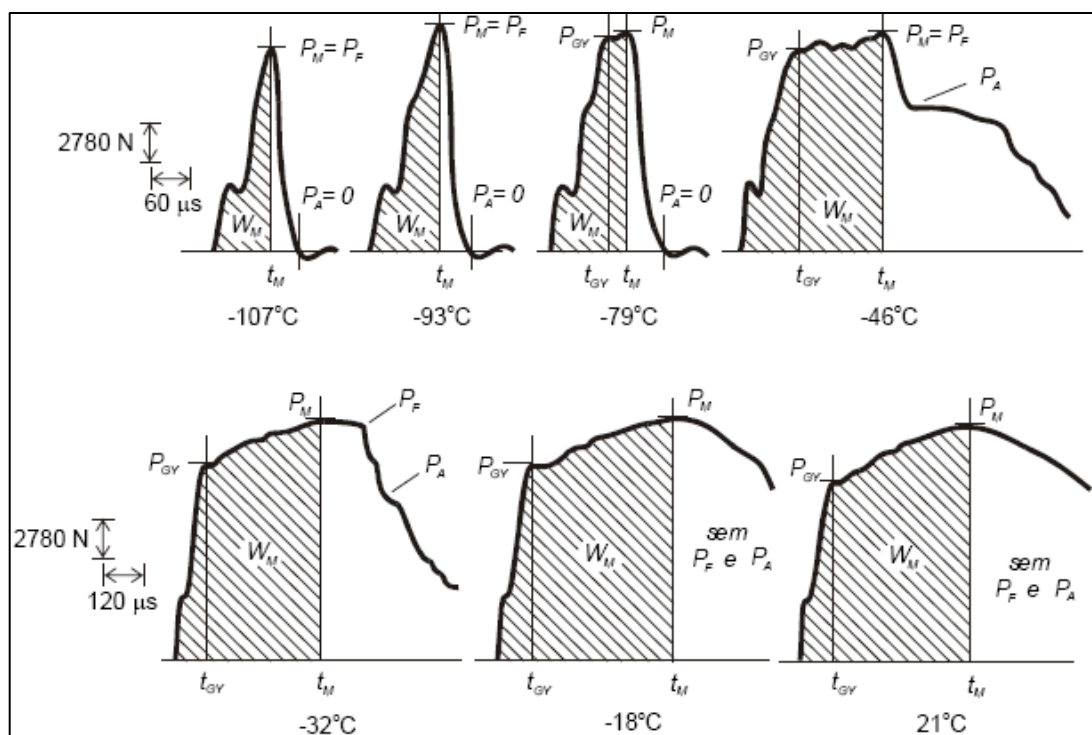
energia fornecido no dial da máquina tradicional apresenta o valor da energia total de fratura somado ao valor das perdas mecânicas da máquina de ensaio.

Enquanto isso, ao instrumentar a máquina de ensaio Charpy o cutelo e/ou corpo de prova passam a atuar como células de carga, capazes de fornecer os valores de força e energia em função do deslocamento ao longo de todo o ensaio, ou seja, é possível monitorar todo o processo de deformação e fratura do corpo de prova e obter valores de força e energia no instante de iniciação da trinca (respectivamente, F_{iu} e W_{iu}) e no ponto de parada da trinca (respectivamente, F_a e W_a), além de fornecer o valor da energia total de fratura livre das perdas mecânicas e valor da força máxima (F_m).

Logo, ao comparar a gama de informações fornecidas pelo ensaio tradicional e pelo instrumentado é possível concluir que é vantajoso realizar os ensaios de impacto utilizando uma máquina instrumentada.

Por exemplo, a figura 7 retirada de Shockey (1995), apresenta as curvas força vs tempo para corpos de prova de aço de média resistência mecânica em diferentes temperaturas obtidas através do ensaio Charpy instrumentado.

Figura 7 - Resposta ao impacto (força vs tempo) para um aço de média resistência mecânica sob diferentes condições de temperatura.



Fonte: Shockey (1995).

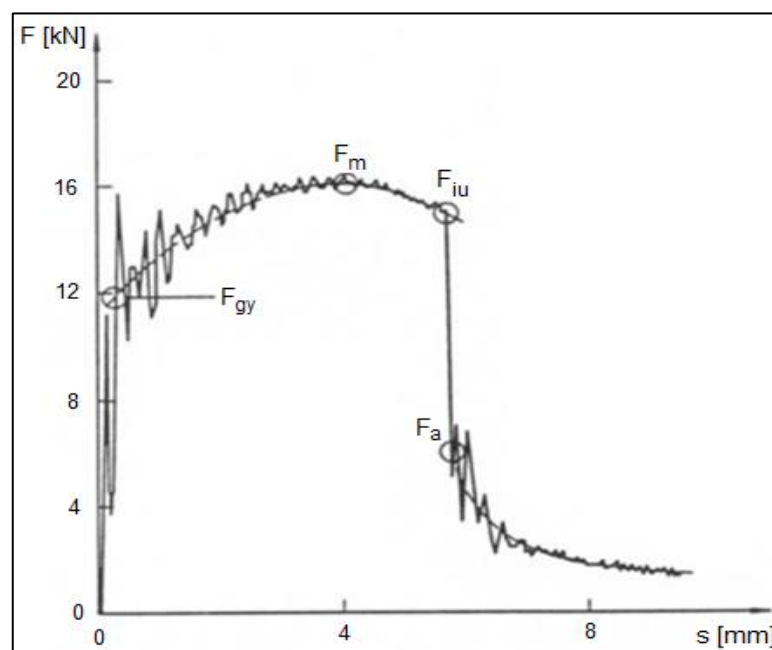
P_M representa, na figura 7, o carregamento máximo durante o ensaio que ocorre no instante de tempo t_M , a energia absorvida até o instante t_M é igual a W_M . A partir do instante t_{Gy} sob o carregamento P_{Gy} o corpo de prova começa a se deformar plasticamente. P_A indica o carregamento no instante de parada da trinca.

Portanto, é possível observar a mudança no comportamento da força em função do deslocamento (deformação) durante a transição dúctil-frágil dos materiais através do ensaio Charpy instrumentado, assim como a obtenção de informações necessárias para a realização de estudos no âmbito da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) ou da mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP), detalhadas no capítulo 7 deste estudo.

A partir das contribuições feitas para o desenvolvimento e melhoria na metodologia utilizada no ensaio instrumentado surgiu a norma ISO 14.556 (2000), que faz exigências quanto às características do sistema de medição. Esta norma pode ser aplicada para outros materiais metálicos fornecendo informações sobre o comportamento em fratura dos produtos ensaiados.

Com a finalidade de padronização internacional, foram adotados os seguintes termos e definições apresentados a seguir. O gráfico da figura 8 mostra alguns pontos de grande interesse da curva força vs deslocamento.

Figura 8 - Pontos de interesse na curva força vs tempo obtida através do ensaio Charpy instrumentado.



Fonte: *International Standard Steel 14.556 (2000)*.

De acordo com a norma ISO 14.556 (2000), são definidas as seguintes nomenclaturas para os parâmetros obtidos através do ensaio Charpy instrumentado:

Valores característicos da força ou carregamento

Nota: Valores característicos da força ou carregamento são expressos em Newtons.

Força ou carregamento no escoamento (F_{gy})

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

Força ou carregamento máximo (F_m)

Máxima força no percurso da curva força-deslocamento.

Força ou carregamento 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 ou carregamento para parar a trinca (F_a)

Força no final da instabilidade de propagação da trinca.

Valores característicos do deslocamento ou deflexão

Nota: Valores característicos do deslocamento ou deflexão são expressos em metros.

Deslocamento ou Deflexão no escoamento generalizado (S_{gy})

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

Deslocamento ou Deflexão na força máxima (S_m)

Deslocamento correspondente à força máxima.

Deslocamento ou Deflexão na iniciação da trinca (S_{iu})

Deslocamento para a inicialização da instabilidade de propagação da trinca.

Deslocamento ou Deflexão no ponto de parada da trinca (S_a)

Deslocamento para deter instabilidade para propagação da trinca.

Deslocamento ou Deflexão 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)

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 $S=S_t$.

A tabela 1 a seguir reúne todas estas informações, apresentando os símbolos e significados adotados pela ISO 14.556 (2000) e as unidades das grandezas envolvidas. Esta norma também faz consideração sobre as configurações mínimas do sistema de aquisição, que deve ser composto por um conversor analógico-digital de (no mínimo) 8 bits com uma taxa de amostragem de 250 kHz ou deve ser capaz de fazer a aquisição de 2000 palavras de 12 bits em um intervalo de 8 ms.

Segundo a norma ISO 148-1 (2009), ao integrar a curva *força vs deslocamento* obtida durante o ensaio com auxílio deste sistema obtém-se o valor da energia total do impacto (W_t), também conhecida como energia global de fratura, ou seja, é toda energia absorvida pelo corpo de prova durante o ensaio.

As curvas *força vs deslocamento* e *energia vs deslocamento* fornecem informações consideráveis sobre o comportamento à fratura do corpo de prova.

De acordo com a norma ISO 148-2 (2008), pode-se comparar o valor da energia total de impacto instrumentado, W_t , obtido a partir da integração da curva *força vs deslocamento* com o registrado pelo dial da máquina de ensaio (relógio mostrador), KV a fim de avaliar se estes apontam para o mesmo valor. Se a divergência entre ambos exceder ± 5 J, deve-se investigar:

- a) o atrito do sistema mecânico da máquina;
- b) a calibração do sistema de medidas;
- c) a rotina de integração utilizada.

A medição de força normalmente é realizada empregando-se dois extensômetros ativos colados no cutelo original, para formar o transdutor de força. Então os extensômetros são ligados de modo a formar uma ponte de *Wheatstone*, conforme detalhado no item 4 deste estudo.

Tabela 1 - Símbolos, significados e unidades conforme a Norma ISO 14.556 (2000).

Símbolo	Significado	Unidade
f_g	Limite da frequência de saída	Hz
F	Força ou carregamento	N
F_a	Força ou carregamento no ponto de parada da trinca	N
F_{gy}	Força ou carregamento no escoamento plástico	N
F_{iu}	Força ou carregamento na iniciação da trinca	N
F_m	Força ou carregamento máximo	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 ou Deflexão	m
s_a	Deslocamento ou Deflexão no final da trinca	m
s_{gy}	Deslocamento ou Deflexão no escoamento generalizado	m
s_{iu}	Deslocamento ou Deflexão na iniciação da trinca	m
s_m	Deslocamento ou Deflexão na força máxima	m
s_t	Deslocamento ou Deflexão total	m
t	Tempo	s
t_o	Tempo para o início da deformação elástica do CP	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 global de fratura	J

Fonte: International Standard Steel 14.556 (2000).

O par de extensômetros colados em lados opostos do cutelo compõe o transdutor de força enquanto os outros dois restantes fazem a compensação de temperatura³. 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 medição de força (cutelo instrumentado, amplificador, sistema de aquisição e tratamento de dados) deve ter uma resposta em frequência de pelo menos 100 kHz, que corresponde ao tempo de subida, t_r , de não mais que 3,5 μ s.

De acordo com a norma ISO 14.556 (2000), a avaliação dinâmica da medida da força encadeada pode ser simplificada pela medida dos valores de pico iniciais. Pela experiência, a cadeia de medição dinâmica pode ser considerada satisfatória se o corpo de prova de aço com entalhe em V apresentar um pico inicial maior que 8 kN, para uma velocidade de impacto entre 5 m/s e 5,5 m/s. Isto é válido se o centro dos extensômetros ativos estiverem afastados a uma distância entre 11 mm e 15 mm 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. Em geral, a força máxima registrada variam entre 10 kN e 40 kN quando são utilizados corpos de prova com entalhe em V para os variados tipos de aços.

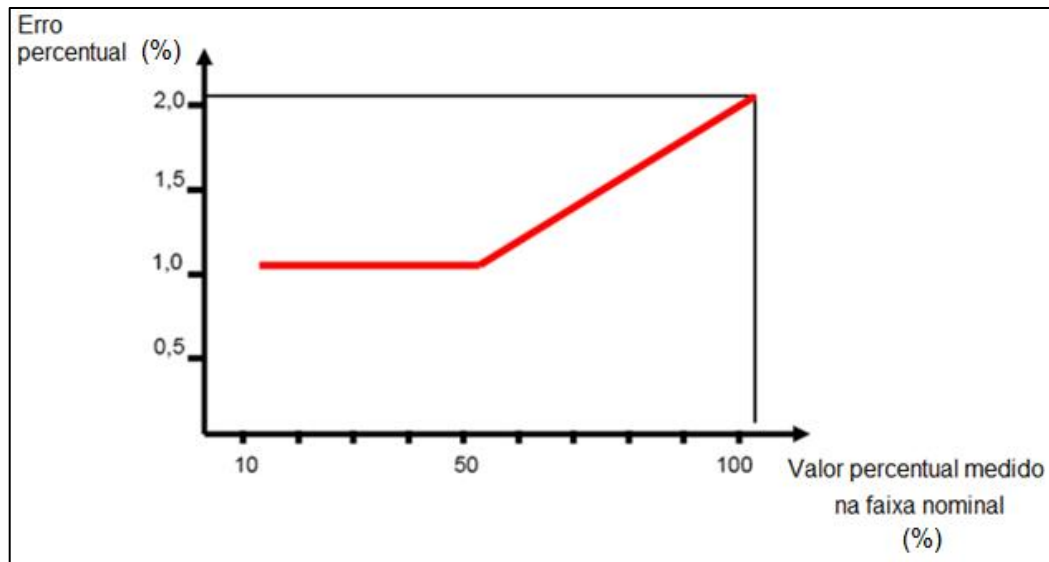
A norma ISO 14.556 (2000) também recomenda que a calibração seja realizada com o cutelo acoplado na máquina de ensaio. A força é aplicada no cutelo por uma máquina de carregamento equipada com uma célula de carga calibrada e utilizando-se uma base bem rígida capaz de sustentar este aparato. As condições de contato devem ser aproximadamente iguais, no sentido de fornecer resultados reprodutíveis.

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, devem estar dentro de $\pm 2\%$ da força medida, quando a faixa da força nominal estiver entre 50% e 100%, e dentro de $\pm 1\%$ do fundo de escala dos valores de força, quando a faixa da força nominal estiver entre 10% e

³ Elimina o efeito causado por variações na temperatura ambiente, que causa variação na resistência do extensômetro.

50% (vide figura 9). Para a instrumentação do cutelo sozinho, recomenda-se que a acuracidade seja $\pm 1\%$ dos valores medidos entre 10% e 100% da força nominal.

Figura 9 - Erro permissível de valores registrados dentro de uma faixa de força nominal.



Fonte: International Standard Steel 14.556 (2000).

A norma ISO 14.556 (2000) exige ainda que a máquina de ensaio Charpy e o sistema de medição devem ser 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 ao longo do ensaio, como com o auxílio de um interferômetro⁴ (Tronskar et al., 2002), é possível estimá-lo através da equação 3, decorrente da Segunda Lei de Newton (equação 2).

$$\sum F = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) \quad (2)$$

$$S(t) = \int_{t_0}^t \left(V_0 - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F(t) dt \right) dt \quad (3)$$

Onde,

⁴ Interferômetro é um dispositivo capaz de realizar medições de ângulos e de distâncias utilizando um feixe de laser.

t_0 : instante em que o martelo está na iminência de tocar no corpo de prova;

V_0 : velocidade inicial do martelo;

m : massa do martelo pendular;

t : instante em que martelo e corpo de prova perdem o contato físico;

F : força em função do tempo;

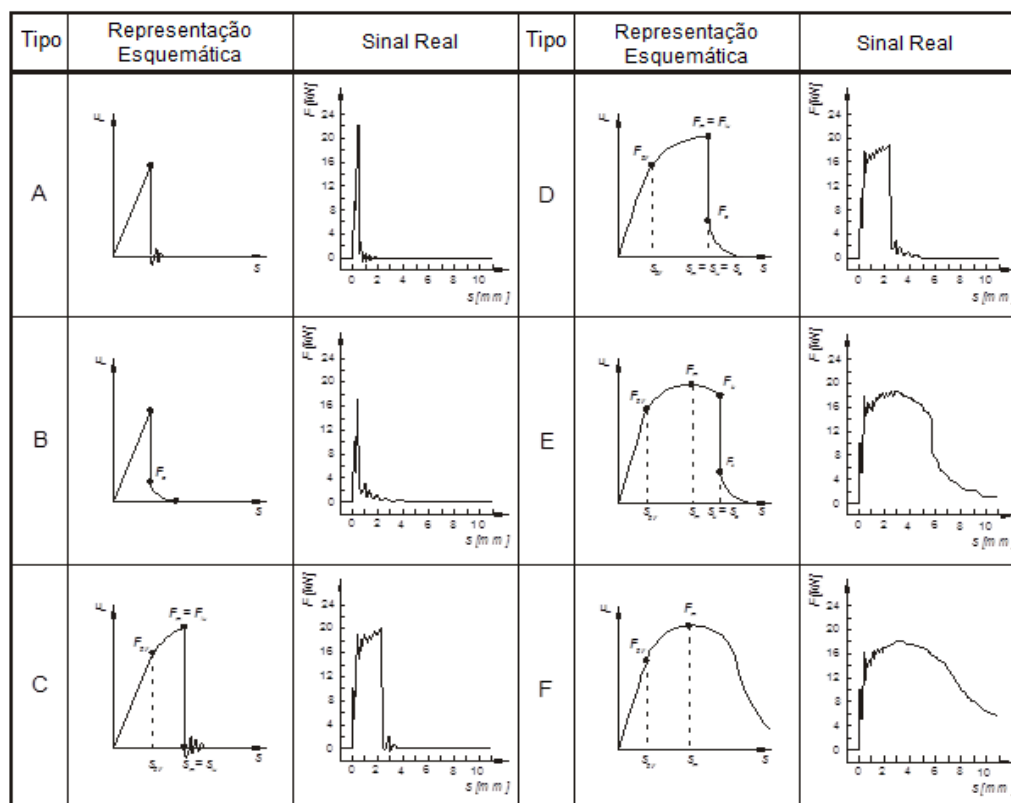
V : velocidade em função do tempo;

S : deslocamento em função do tempo.

A violação de qualquer um dos procedimentos gerais implica na obtenção de resultados equivocados (ISO 14.556, 2000).

A avaliação da curva *força vs deslocamento* para a determinação das forças utilizadas nos cálculos da tenacidade é feita considerando-se a classificação dos diversos formatos de sinais (vide figura 10) classificadas pela própria norma ISO 14.556 (2000) com as letras de A a F.

Figura 10 - Curva característica força-deslocamento classificadas pela norma ISO 14.556.



Fonte: International Standard Steel 14.556 (2000).

Uma vez que as curvas são obtidas, o valor da tenacidade (equação 4) é determinado pela área sob a curva tensão vs deformação obtida através o ensaio, ou seja, através da integração da curva a partir do instante em que o cutelo está na iminência de colidir com o corpo de prova, deformação nula, até a máxima deformação, na qual ocorre a fratura final.

$$E = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma \cdot d\varepsilon \quad (4)$$

Onde,

W_t : energia global de fratura [J];

σ : tensão [MPa ou GPa];

ε : deformação;

ε_f : deformação final (no instante em que ocorre a fratura final).

Sabendo que $\sigma = F/A$ e que $d\varepsilon = dL/L_0$, então a equação 4 pode ser reescrita da forma apresentada na equação 5.

$$W_t = \int_0^{\varepsilon_f} \frac{F}{A_0} \cdot \frac{dL}{L_0} \quad (5)$$

Onde,

F : força [N ou kN];

A_0 : seção inicial do corpo de prova [m²];

L : variação no comprimento do corpo de prova [m];

L_0 : comprimento inicial do corpo de prova [m].

Mas sabendo que o volume inicial do corpo de prova (prismático) é dado por $V_0 = A_0 \cdot L_0$, então a equação 5 pode ser reescrita na forma apresentada através da equação 6.

$$W_t = \frac{1}{V_0} \int_0^{\varepsilon_f} F \cdot dL \quad (6)$$

Onde,

V_0 : Volume inicial do corpo de prova [m³].

Logo, a energia global de fratura pode ser calculada através da equação 6, sendo necessário entrar com os dados da força e do deslocamento obtidos experimentalmente, direta ou indiretamente.

4 NOÇÕES DE INSTRUMENTAÇÃO

4.1 Instrumentos de medição

Segundo Doebelin (2004), os instrumentos de medições são utilizados para monitorar processos e operações, podem ser utilizados em uma malha de controle e também são empregados em análises experimentais em engenharia. Porém, um mesmo instrumento pode possuir qualquer uma das funções citadas dependendo do ponto de vista.

Em relação a esta última, há duas abordagens distintas: teórica e experimental.

A abordagem **teórica** geralmente fornece resultados de uso geral. Além disso, é necessário recorrer a suposições simplificadoras, ou seja, utiliza-se um modelo simplificado, cujos resultados apresentam diferenças em relação ao comportamento real do sistema.

Em algumas situações o equacionamento do sistema torna-se demasiadamente complexa, sendo necessário utilizar ferramentas computacionais.

No entanto, a abordagem teórica não demanda tempo para a realização de montagens experimentais, na coleta de dados e calibração e montagem dos equipamentos de medição.

Ao passo que a abordagem **experimental** fornece resultados limitados a uma aplicação específica, embora algumas técnicas permitam generalizações.

Porém, não é necessário fazer hipóteses simplificadoras, pois os resultados já refletem o comportamento verdadeiro do sistema, todavia pode ser necessário empregar equipamentos complexos e de custo elevado para conseguir realizar medições capazes de revelar o comportamento real do sistema. Também é necessário investir uma quantidade de tempo considerável para projetar, construir, checar o aparato de medição.

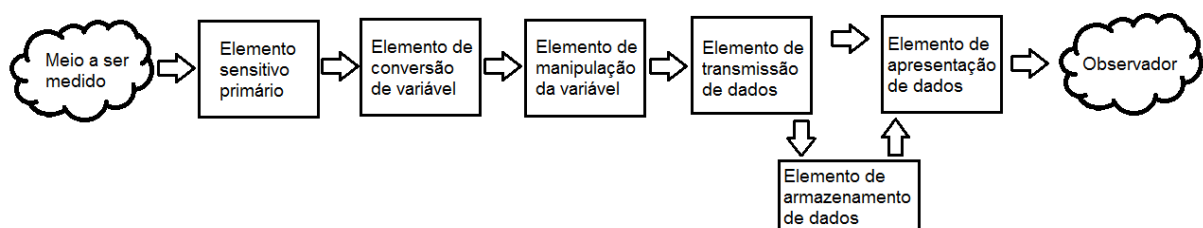
Quanto aos instrumentos empregados na análise experimental em engenharia, Doebelin (2004) afirma que estes podem ser utilizados para testar predições teóricas baseadas em hipóteses simplificadoras (ou seja, testam a validade das simplificações adotadas), também podem ser utilizados para auxiliar na formação de uma relação empírica em situações nas quais não existe uma teoria

suficientemente desenvolvida, além de auxiliar na compreensão de um fenômeno físico ou na solução de equações matemáticas por analogia.

Instrumentos de medição também podem auxiliar na caracterização de materiais, na determinação de componentes e parâmetros de um sistema, na determinação de variáveis e índice de desempenho.

Todo instrumento de medição é composto pelos blocos funcionais representado na figura 11. Porém, os blocos funcionais não correspondem aos elementos físicos que compõem o instrumento de medição, pois um elemento físico pode desempenhar duas ou mais funções mencionadas. Os diferentes instrumentos podem conter as funções básicas arranjadas de modo distinto e em diferente número, Doebelin (2004).

Figura 11 - Elementos funcionais de um sistema de medição.



Fonte: Adaptado de Doebelin (2004).

O **elemento sensitivo primário** é aquele que recebe energia do meio, isto causa uma perturbação no meio devido justamente ao processo de medição, por isso teoricamente não existe uma forma de se obter uma medida perfeita.

A saída do elemento físico primário é uma variável física, mas para que o instrumento execute a opção desejada é preciso converter a variável física em outra, esta é a função do bloco denominado **elemento de conversão**.

O **elemento de manipulação** de variável realiza a manipulação dos dados que representam uma variável física, mas mantem a natureza física dessa variável. Por exemplo, um amplificador produz em sua saída um sinal dezenas ou centenas de vezes maior que o da entrada. Na verdade, o elemento de manipulação pode ocupar qualquer posição no diagrama de blocos, pode também não estar presente.

O **elemento de transmissão de dados** representa o canal que une os elementos funcionais do instrumento de medição. Este pode ser composto por fios e

cabos, um sistema de eixos e rolamentos, um complexo sistema de telemetria, entre outros.

A função do **elemento de apresentação de dados** é a de colocar os dados em uma forma em que o **observador** seja capaz de reconhecer através dos sentidos, como através de um ponteiro movendo em uma escala ou um display. Mas nem todos os elementos de apresentação de dados são visuais, alguns podem usar outros sentidos, como a audição ou o toque. O **elemento de armazenamento de dados** é composto por um elemento capaz de guardar os dados por certo tempo esperando o momento em que o observador necessitará deles, pode ser composto, por exemplo, por uma memória computacional.

Os componentes que realizam as funções citadas podem ser classificados como transdutores, que por sua vez podem ser classificados como ativos ou passivos.

Transdutores passivos são os componentes cuja energia da saída é fornecida exclusivamente pelo sinal da entrada, sensores piezoelétricos são exemplos disso. Já a energia do sinal de saída dos transdutores passivos é suprida por uma fonte auxiliar, como é o caso dos circuitos amplificador.

Os instrumentos de medição também podem ser classificados como digitais e analógicos. Os analógicos são aqueles que apresentam um sinal de leitura contínua, sendo que a saída pode assumir valores infinitesimais. Os digitais apresentam um sinal de saída discreto, logo a saída pode assumir valores finitos dentro de uma dada faixa de operação.

4.2 Extensômetro elétrico

Extensômetros elétricos são capazes de variar a resistência entre seus terminais em função da deformação em que for submetido. O campo de aplicação dos extensômetros é bastante amplo, podendo ser utilizado para medir a deformação em uma amostra até as últimas cargas em um ensaio destrutivo.

De acordo com Doebelin (2004) e Andolfato (2004), os extensômetros, de modo geral, apresentam as seguintes características:

- a) alta precisão de medição;
- b) tamanho e massa reduzidos;

- c) excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- d) fácil utilização (se adotadas as práticas adequadas);
- e) excelente linearidade;
- f) é possível realizar medições dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- g) pode ser utilizado em ambientes agressivos (se devidamente protegido);
- h) possibilita a medição em lugares remotos;
- i) a saída pode ser conectada a um sistema de controle.

O princípio de funcionamento dos extensômetros elétricos é bastante simples. Por exemplo, ao exercer uma força $\vec{F}$ sobre um componente que possui uma seção inicial A_0 aparecerá uma reação interna para contrabalancear a ação externa, a magnitude dessa força interna por unidade de área é chamado de *tensão*, Andolfato et al. (2004).

O esforço aplicado pode ser decomposto em uma componente normal ou tangente ao plano. Forças de tração ou compressão (figura 12-a e 12-b) geram uma tensão normal ao plano, tensão normal é representada pelo símbolo σ , forças tangentes (figura 12-c) ao plano implicam no aparecimento de tensões cisalhantes, representadas pelo símbolo τ .

Uma vez que existe uma força externa agindo e há uma reação (tensão) no corpo (seja este um componente ou uma estrutura), este tende a deformar-se, a deformação de engenharia ε é definida pela equação 7.

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7)$$

Onde,

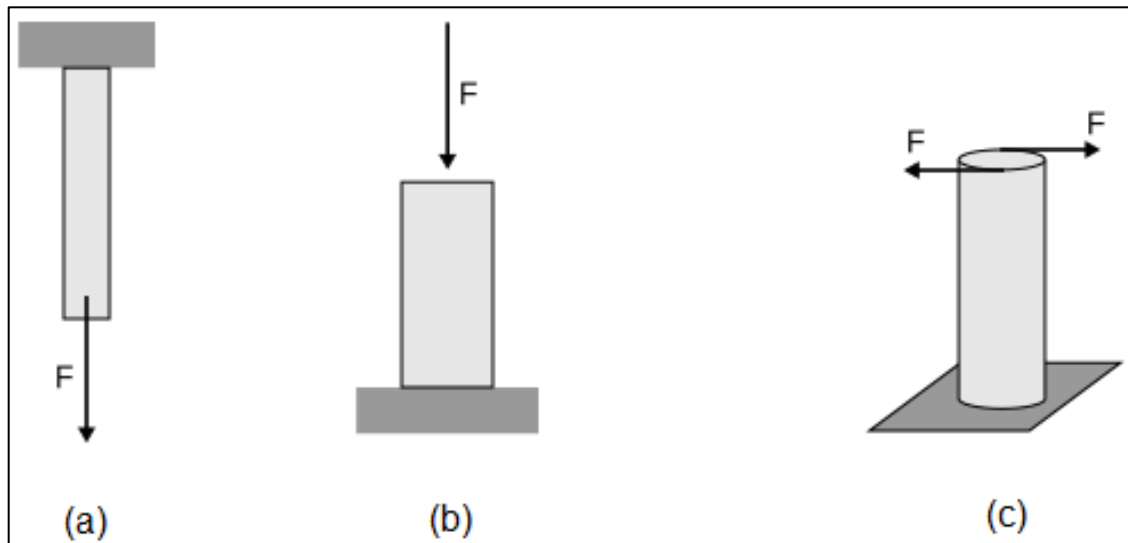
ε : deformação;

l_i : comprimento instantâneo;

l_0 : comprimento inicial;

Δl : alongamento.

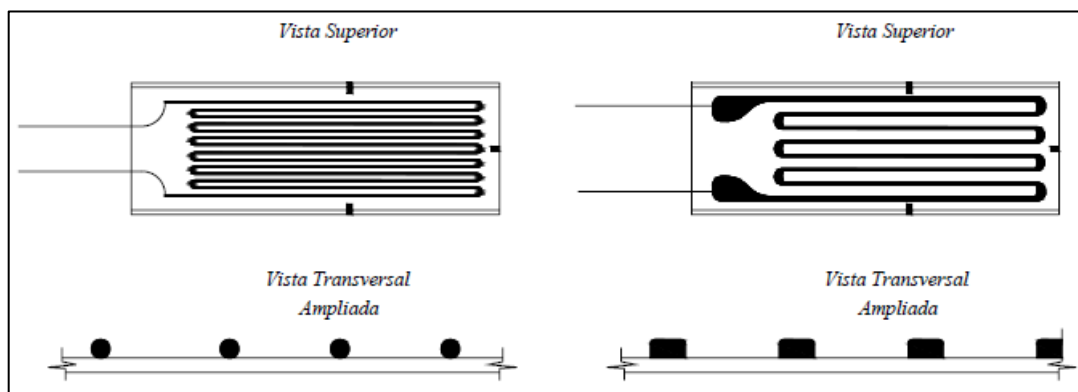
Figura 12 - (a) Força externa tracionando o corpo, (b) força comprimindo o corpo e (c) força cisalhante.



Fonte: Andolfato (2004).

Se o extensômetro for colado neste corpo que está se deformando, então ele se deformará também. É sabido que os extensômetros são compostos por um elemento resistivo, ou como fio ou como lâmina (*foil*), conforme apresentado na figura 13.

Figura 13 - Extensômetros elétricos (a) de fio e (b) em lâmina (foil).

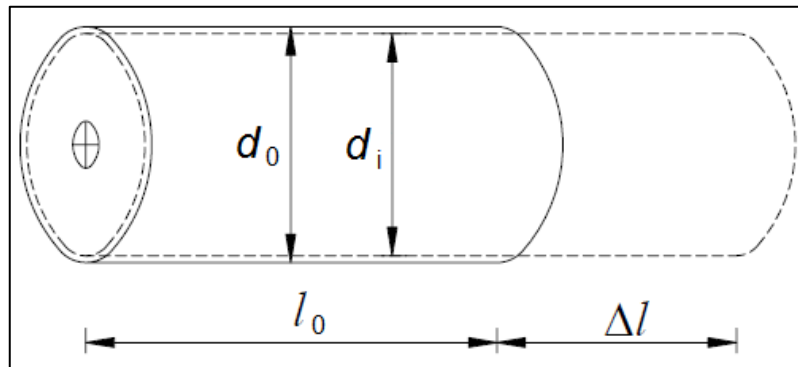


Fonte: Andolfato (2004).

A mudança nas dimensões do extensômetro causada pela deformação do corpo, no qual este se encontra colado implica na mudança da resistência do extensômetros, conforme enunciado pela 2ª Lei de Ohm, vide equação 8. Para

exemplificar esta variação na resistência toma-se o elemento resistivo apresentado na figura 14.

Figura 14 - Elemento resistivo.



Fonte: Andolfato (2004).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \rho \cdot \frac{l}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (8)$$

Onde,

R : Resistência elétrica;

ρ : resistividade;

l : comprimento;

A: área da seção;

d : diâmetro da seção.

É fácil notar que a variação nas dimensões, no comprimento (alongamento) e no diâmetro, causa uma variação na resistência do componente.

Sabe-se que a variação relativa na resistência é diretamente proporcional à deformação, como apresentado na equação 9, a dedução se encontra no Anexo B deste estudo.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Onde:

ΔR : variação na resistência;

R : valor da resistência inicial (sem deformação);

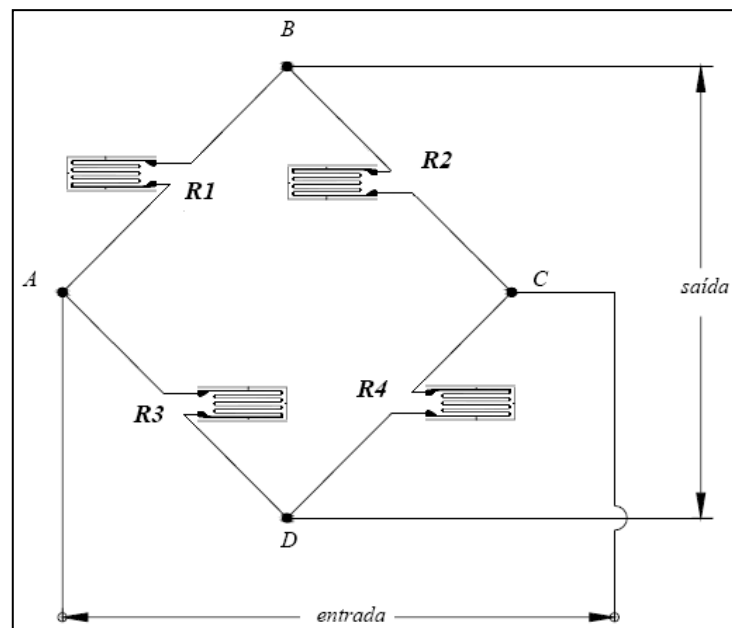
K : sensibilidade à deformação;

ε : deformação;

Após saber como o extensômetro é capaz de variar sua resistência ao se deformar juntamente com o componente ou estrutura na qual está colado, é preciso construir um dispositivo capaz de utilizar este conceito para medir as grandezas físicas por esta deformação.

Para medir deformação é usual recorrer a circuitos em ponte, ou seja, são montadas pontes de *Wheatstone* empregando um extensômetro em cada um dos braços da ponte, conforme apresentado na figura 15.

Figura 15 - Ponte de extensômetros.



Fonte: Adaptado de Andolfato (2004).

Se uma fonte de corrente contínua que fornece uma tensão E for conectada entre os terminais A e C, denominados como “entrada”, a tensão na saída da ponte, ou seja, entre os terminais B e D será dada pela equação 10, caso os extensômetros sejam nomeados conforme apresentado na figura 15.

$$e = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot E \quad (10)$$

Onde:

E : tensão na entrada;

e : tensão na saída;

R₁, R₂, R₃, R₄ : resistência dos extensômetros.

A equação 10 pode ser reescrita na forma apresentada pela equação 11 (após fazer o m.m.c. das duas parcelas).

$$e = \left[\frac{(R_3 \cdot R_2) - (R_1 \cdot R_4)}{(R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3) + (R_1 \cdot R_4) + (R_2 \cdot R_4)} \right] \cdot E \quad (11)$$

Através dos passos detalhados no Anexo C deste estudo é possível afirmar que a tensão na saída pode ser escrita na forma apresentada pela equação 12.

$$e = \frac{K \cdot E}{4} \cdot (-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (12)$$

Onde:

E : tensão na entrada;

e : tensão na saída;

ε₁, ε₂, ε₃, ε₄ : deformação nos extensômetros.

Rearranjando a equação 12 tem-se a equação 13.

$$-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \frac{4 \cdot e}{K \cdot E} \quad (13)$$

Com base na equação é possível determinar a deformação em função da relação entre a tensão de entrada e saída para um circuito em ponte.

Vale ressaltar que a deformação ϵ engloba tanto as deformações devido às tensões normais e cisalhantes e, também, efeitos térmicos. Devido a este último é comum ver montagem que empregam meia ponte e utilizam dois extensômetros para compensação do efeito da temperatura (compensador estático, vide figura 43).

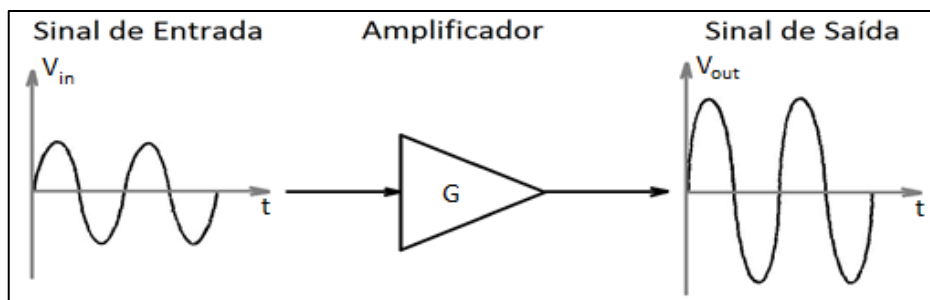
O Anexo D apresenta possíveis aplicações empregando ponte de extensômetros e respectivas montagens propostas pela Kyowa® (2012) em seu manual on-line.

4.3 O amplificador de instrumentação

Todo amplificador apresenta na saída uma grandeza dada pelo produto entre a entrada e o fator multiplicativo, denominado ganho, Franco (2002).

Por exemplo, o amplificador operacional (A.O.) é capaz de aumentar a potência de um sinal através do aumento da amplitude da tensão ou corrente, porém deve-se atentar que o comportamento do sinal (forma de onda) permanece inalterado na saída, com o ilustrado na figura 16. Certamente, a potência fornecida ao sinal é fornecida por uma fonte auxiliar, na qual o amplificador é conectado.

Figura 16 - Sinal após receber um ganho G proporcionado pelo amplificador.



Fonte: Adaptado de Franco (2002).

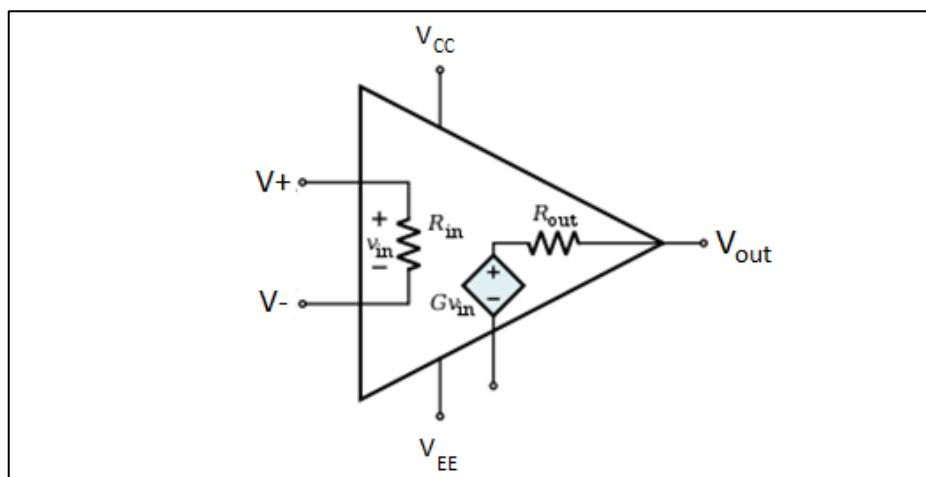
Segundo Andolfato (2004, p.1-30), o amplificador operacional possui características muito interessantes, como:

- a) elevada resistência de entrada: isto permite causar o mínimo de interferência possível na fonte que está gerando o sinal a ser amplificado, pois a potência consumida na entrada é extremamente reduzida;
- b) reduzida impedância de saída;

- c) entrada diferencial: interferências em modo comum são fortemente atenuadas;
- d) ganho elevado, dado pelos componentes externos (porém o A.O. só trabalha em baixas potências);
- e) elevada faixa de passagem;
- f) elevada razão de rejeição modo-comum (CMRR).

Com base nessas características, o amplificador operacional pode ser modelado através do circuito equivalente apresentado na figura 17:

Figura 17 - Circuito equivalente simplificado para o amplificador operacional.



Fonte: Adaptado de Franco (2002).

Onde, R_{in} é uma resistência muito elevada na entrada e a saída é composta por uma resistência muito reduzida R_{out} e uma fonte de corrente controlada pela tensão em R_{in} , representada por V_{in} .

$V+$ corresponde a entrada não-inversora e $V-$ a inversora, V_{out} é a tensão de saída, V_{CC} e V_{EE} são os terminais conectados a uma fonte externa.

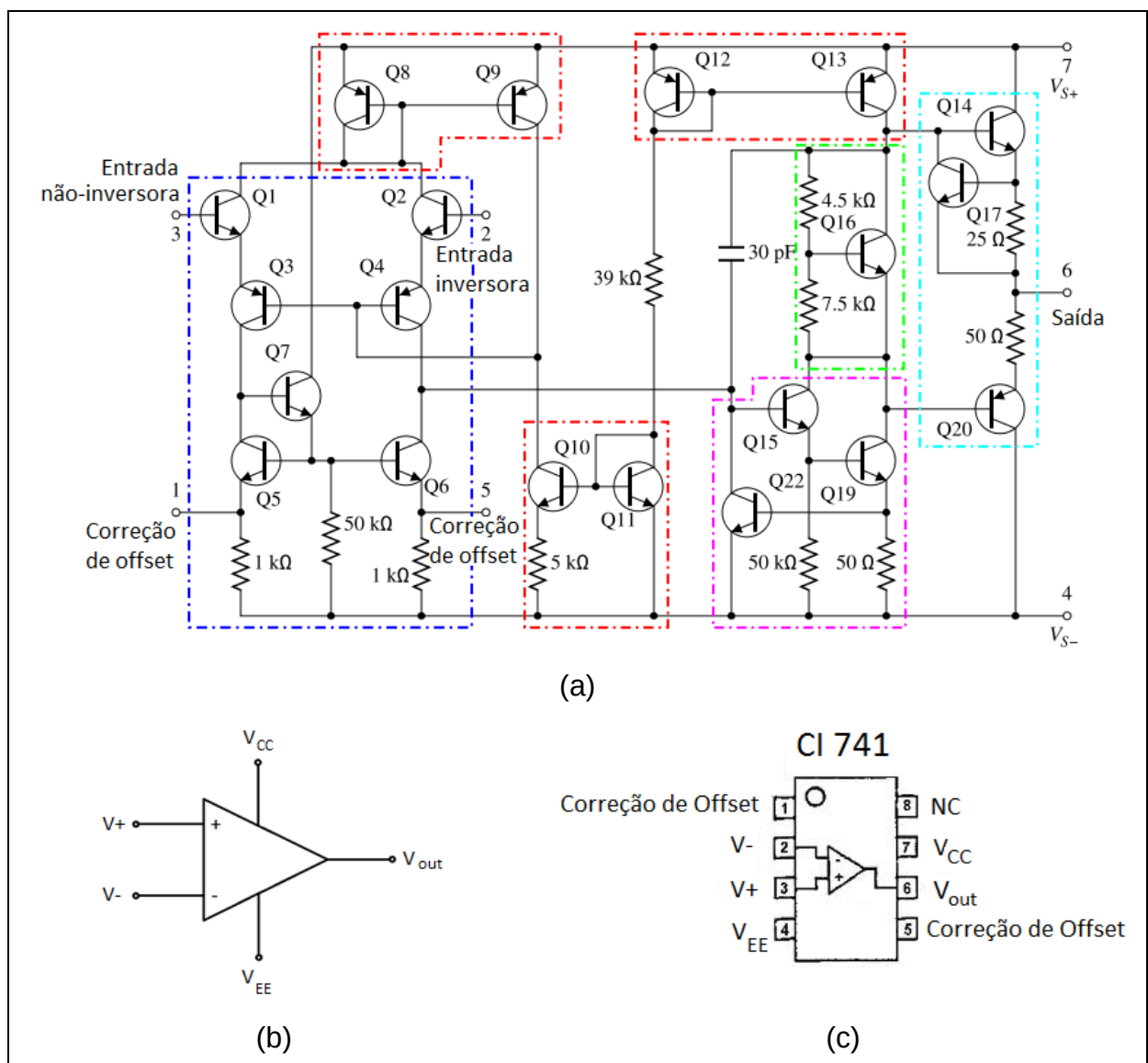
Certamente, o circuito apresentado na figura 18 trata-se apenas de uma simplificação, que pode ser utilizada em projetos a fim de facilitar os cálculos das tensões e correntes envolvidos. A figura 18-a apresenta um diagrama esquemático do circuito que compõe um A.O., a figura 18-b seu diagrama esquemático e a figura 18-c exibe um A.O. encapsulado.

Existe um grande número de circuitos que empregam amplificadores operacionais, porém um deles merece destaque neste estudo, é o

amplificador de instrumentação, apresentado na figura 19, cuja equação da tensão de saída em função da diferença de potencial na entrada é dada pela equação 14.

A modelagem do funcionamento do A.O. e a dedução do ganho proporcionado pelo amplificador de instrumentação podem ser encontradas de forma detalhada em Franco (2002).

Figura 18 - (a) Diagrama esquemático do circuito que compõe um amplificador operacional 741⁵, (b) bloco esquemático utilizado para representar um A.O. e (c) identificação dos pinos do CI 741 – amplificador operacional.



Fonte: (a) AMPLIFICADOR ... (2007), (b) e (c) adaptado de Franco (2002).

⁵ As linhas pontilhadas correspondem a: espelhos de corrente (vermelho); amplificador diferencial (azul); estágio de ganho classe A (magenta); estágio anterior da saída (verde); estágio de saída (cian),

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_G}\right) \cdot \left(\frac{R_3}{R_2}\right) \cdot V_{in} = G \cdot V_{in} \quad (14)$$

Onde:

V_{in} : diferença de potencial na entrada (ou seja, $V_{in} = V_1 - V_2$);

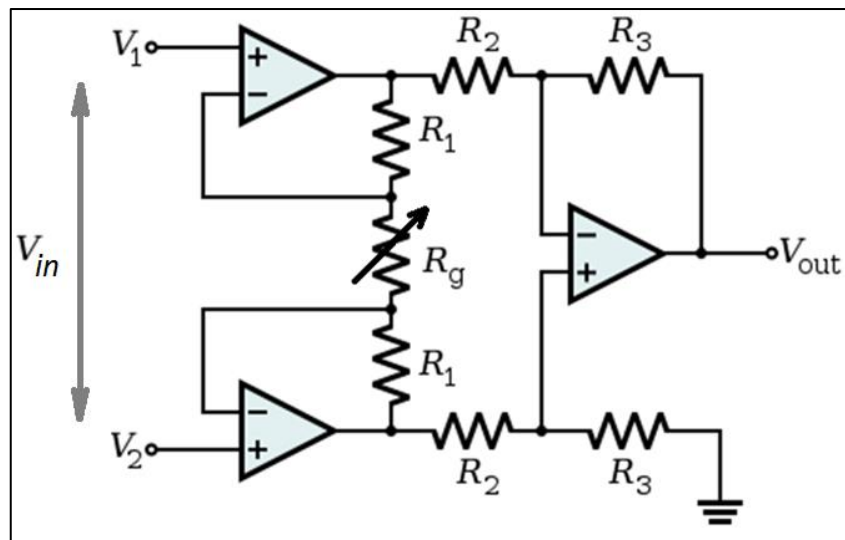
V_{out} : tensão na saída;

R_1, R_2, R_3, R_4 : resistência;

R_G : resistência (valor fixo ou variável);

G : ganho.

Figura 19 - Amplificador de instrumentação.



Fonte: Adaptado de Franco (2002).

Segundo Franco (2002), o amplificador de instrumentação possui as seguintes características:

- a) impedância de modo-comum e modo-diferencial extremamente elevadas (idealmente infinitas);
- b) impedância de saída (idealmente nula);
- c) ganho preciso e estável, tipicamente na faixa de 1 V/V para 10^3 V/V;
- d) rejeição de modo-comum extremamente elevado.

5 AMOSTRAGEM E PROCESSAMENTO DE SINAIS

5.1 Classificação de Sinais

Pode-se definir sinal como sendo uma representação matemática de um fenômeno físico dado em função de uma ou mais variáveis independentes (tempo, posição, temperatura, entre outras). Sinais também podem ser sintetizados (gerados com auxílio de um computador, por exemplo).

Os sinais podem estar representados no domínio do tempo contínuo ou no tempo discreto, sendo possível convertê-lo para o tempo discreto ao amostrá-lo e quantificando os valores que ele assume no tempo (truncagem e arredondamento). Também é possível uma função interpoladora para converter um sinal digital em analógico.

Um sinal no tempo contínuo é aquele que está definido para qualquer instante de tempo " t " (variável independente), onde t pode assumir qualquer valor real.

Sinais digitais podem ser representados por uma série de dados $g[n]$, na qual " n " corresponde a valores inteiros, para valores de " n " não inteiros a série não está definida.

Os sinais também podem ser classificados como determinísticos ou como aleatórios, todo sinal que pode ser descrito por uma equação matemática. Para descrever sinais aleatórios é preciso empregar ferramentas estatísticas, como processos estocásticos e probabilidade.

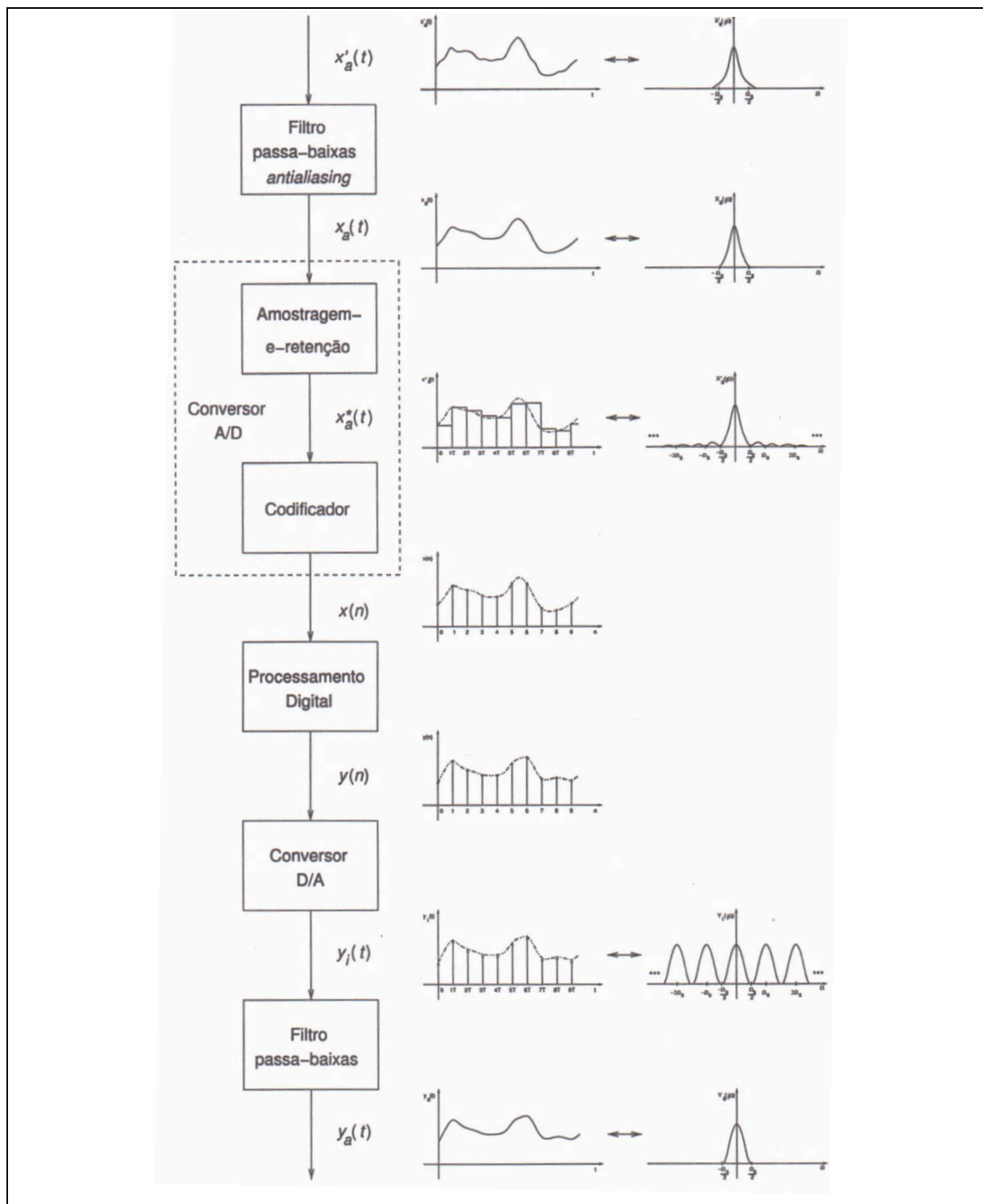
5.2 Teorema da amostragem

O ser humano na antiguidade já amostrava, de forma intuitiva, fenômenos contínuos no tempo ou no espaço. Segundo Prandoni e Vetterli (2008) os egípcios no século XXV A.C. faziam indicações nas rochas para representar o nível do rio Nilo em diferentes épocas do ano, já que a vida ali estava sujeita ao regime das águas do rio, assim era possível estimar a época do plantio e fazer o controle dos estoques de alimentos baseado nas marcações dos anos anteriores.

Atualmente, o objetivo continua sendo o mesmo: representar um evento no tempo contínuo no tempo discreto. A conversão para o tempo discreto é feita através da amostragem do sinal no tempo contínuo, isto torna mais simples a realização de

inúmeras operações que se tornariam complexas se realizadas no tempo contínuo. Se o sinal original for limitado em banda é possível recuperá-lo após o processamento, como ilustrado na figura 20.

Figura 20 - Etapas do processamento de sinais analógicos (à esquerda), sinais no domínio do tempo (centro) e respectivas transformadas de Fourier (à direita).

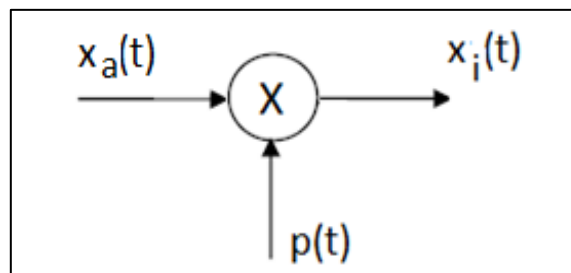


Fonte: Diniz et al (2004).

Segundo Diniz et al (2004), para um dado um sinal de entrada $x'_a(t)$, contínuo no tempo, passa por um filtro passa-baixa *antialiasing*, resultando no sinal $x_a(t)$.

Em seguida, no conversor A/D, é aplicado um trem de pulsos, $p(t)$, sobre o sinal $x_a(t)$, vide equação 15, resultando no sinal auxiliar no tempo contínuo $x_i(t)$, equação 16. A figura 21 representa o diagrama deste processo e figura 22 apresenta um exemplo dos sinais no domínio do tempo e no da frequência dos respectivos sinais.

Figura 21 - Trem de impulsos aplicado ao sinal de entrada (contínuo).



Fonte: Adaptado de Diniz et al (2004).

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (15)$$

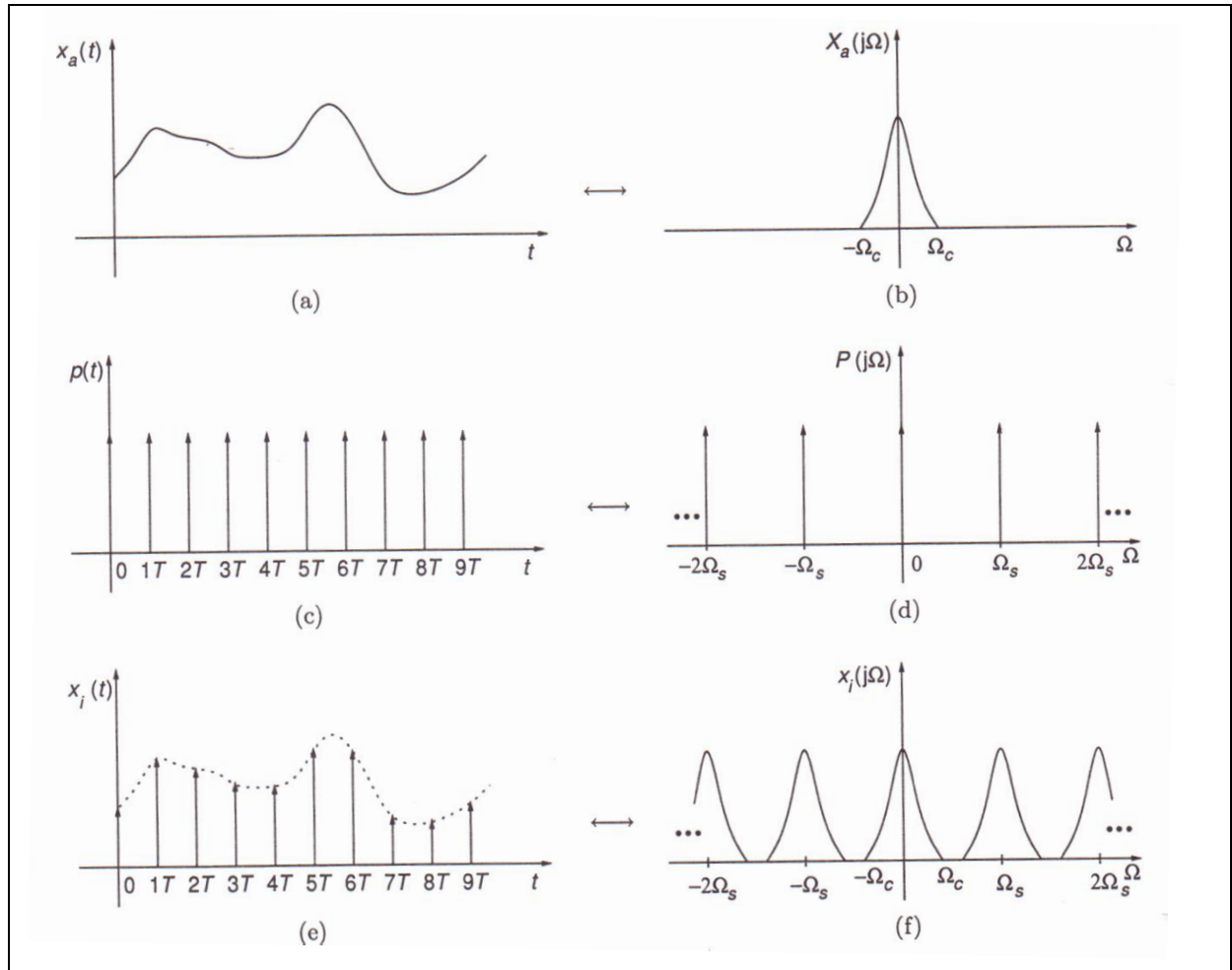
$$x_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \delta(t - nT) \quad (16)$$

Sendo T o período de amostragem, então $x_a(t)$ é univocamente representado pelas suas amostra $x[n] = x_a(nT)$, onde n é sempre dado por um valor inteiro, tal como $= 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Logo, a equação 12 pode ser reescrita da forma apresentada na equação 17.

$$x_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT) \delta(t - nT) = x_a(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) = x_a(t) p(t) \quad (17)$$

Fazendo a transformada de Fourier (TF) do trem de impulsos $p(t)$ e do sinal auxiliar $x_i(t)$ obtêm-se as equações 18 e 19 respectivamente.

Figura 22 - (a) Sinal de entrada no tempo contínuo, (b) espectro do sinal de entrada, (c) trem de pulsos, (d) espectro do trem de pulsos, (e) sinal auxiliar no tempo contínuo, (f) espectro do sinal auxiliar.



Fonte: Diniz et al (2004).

$$P(j\Omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\Omega - \frac{2\pi}{T}k\right) \quad (18)$$

$$X_i(j\Omega) = \frac{1}{2\pi} X_a(j\Omega) * P(j\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X_a(j\Omega - j\Omega') * P(j\Omega') d\Omega' \quad (19)$$

Substituindo a equação 18 na 19 obtém-se a equação 20.

Onde:

t: tempo;

p: trem de impulsos;

T: período de amostragem.

P: trem de impulsos no domínio da frequência;

x_a : sinal de entrada no tempo contínuo; Ω : frequência;

x: sinal no tempo discreto;

x_i : sinal auxiliar;

X_i : Função auxiliar no domínio da frequência.

$$X_i(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_a \left(j\Omega - j \frac{2\pi}{T} k \right) \quad (20)$$

Porém, para que a conversão A/D seja capaz de fazer uma discretização adequada do sinal analógico é preciso que a largura de faixa de sinal do sinal de entrada contínuo no tempo seja dado pela equação 21.

$$\Omega_C < \Omega_S - \Omega_C \quad (21)$$

Ou seja, é possível reescrevê-la na forma apresentada na equação 22

$$\Omega_S = \frac{2\pi}{T} > 2\Omega_C \quad (22)$$

Onde:

Ω_S : frequência de amostragem;

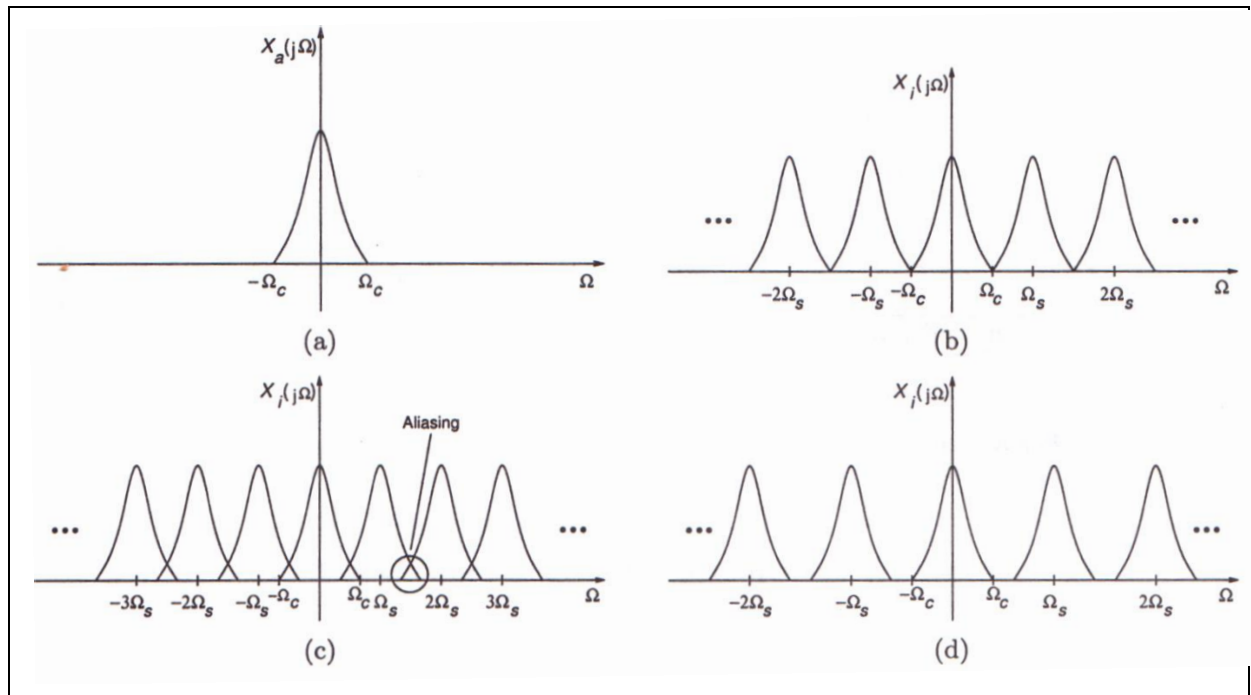
Ω_C : largura de faixa do sinal.

Sendo assim, para que não ocorra uma distorção no sinal, conhecida como *aliasing* (vide figura 23), é preciso que o período de amostragem seja adequado, dado pelo teorema de amostragem de Nyquist, que afirma que a frequência de amostragem deve ser superior ao dobro da maior frequência do espectro desse sinal, vide Diniz et al (2004).

Ao respeitar esta condição o sinal poderá ser reconstituído utilizando um filtro passa-baixa ideal com largura de faixa de $\Omega_S/2$.

Uma vez que o sinal foi amostrado da forma correta, é preciso processá-lo para evidenciar certas componentes e atenuar, ou até mesmo excluir, outras que não fazem parte do sinal de interesse.

Figura 23 - (a) Espectro do sinal no tempo contínuo $x_a(t)$, espectro do sinal auxiliar $x_i(t)$: (b) $\Omega_S = \Omega_C$, (c) $\Omega_S < \Omega_C$ (ocorre aliasing) e (d) $\Omega_S > \Omega_C$.



.Fonte: Diniz et al (2004).

5.3 FFT e DFT

Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) é um algoritmo eficiente para calcular a transformada de Fourier discreta (*Discrete Fourier Transform* - DFT).

A DFT de uma série finita, dada por $\{x_r\}$ onde $r = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$, resulta em uma nova série finita X_k , Newland (1983, p. 150-166), como apresentado na equação 23.

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i\left(\frac{2\pi kr}{N}\right)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (23)$$

A DFT decompõe uma sequência de valores em componentes de diferentes frequências. Esta operação é útil em muitas áreas, mas computá-la através da definição é um processo lento. Pois para 'N' pontos é necessário realizar 'N²' multiplicações, enquanto que a FFT apresenta o resultado após 'N(logN)' operações. A diferença de velocidade pode ser substancial, especialmente para longas séries de dados, onde N pode ser na casa dos milhares ou milhões, na prática, o tempo de computação pode ser reduzido por várias ordens de magnitude em tais casos, a melhoria é aproximadamente proporcional à N/ log(N).

Ou seja, a FFT calcula a DFT e produz um resultado extremamente próximo necessitando de menos recurso computacional. Porém, existe uma característica muito comum na maioria dos algoritmos utilizados no cálculo da FFT, o comprimento do vetor contendo os dados há de ser uma potência de 2, ou seja, $N = 2^n$, sendo n um número positivo. Nem sempre os dados são fornecidos dessa forma, portanto é necessário adicionar zeros no arquivo até que este atinja um número de elementos igual a 2^n , Newland (1983, p. 125-149).

Por exemplo, antes de fazer a FFT de um vetor contendo 1000 elementos é preciso acrescentar 24 elementos nulos, alcançando um número de elementos igual a 1024, ou seja, 2^{10} .

5.4 Filtros digitais

Os filtros digitais podem ser classificados em duas classes em função da duração da sequência $y[n]$ observada na saída quando aplicado um impulso na entrada do filtro, Diniz et al. (2004). O filtro pode apresentar uma resposta ao impulso de duração finita (*Finite Impulse Response* - FIR) ou infinita (*Infinite Impulse Response* - IIR).

Os filtros FIR apresentam a função de transferência apresentada na equação 24 (no domínio z).

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{l=0}^M h(l)z^{-l} \quad (24)$$

Onde:

H: função de transferência;

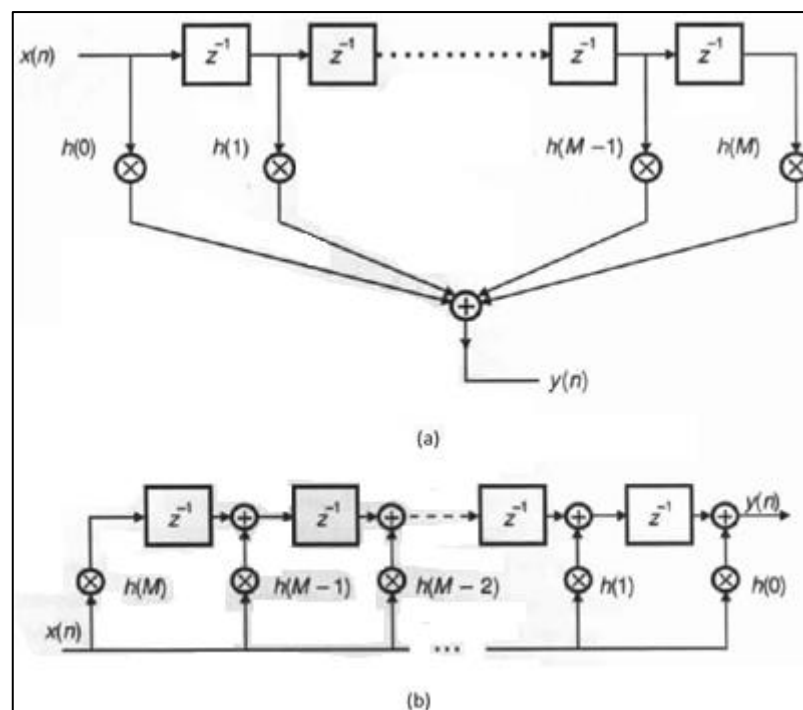
Y: saída do filtro;

X: entrada do filtro;

h: resposta ao impulso.

Filtros FIR apresentam memória finita, são sempre BIBO estáveis (*bounded-input bounded-output*) e o atraso causado pelo filtro é constante. A figura 24 apresenta alguns exemplos de implementação de um filtro FIR.

Figura 24 - (a) Forma direta para filtros digitais FIR e (b) forma alternativa.



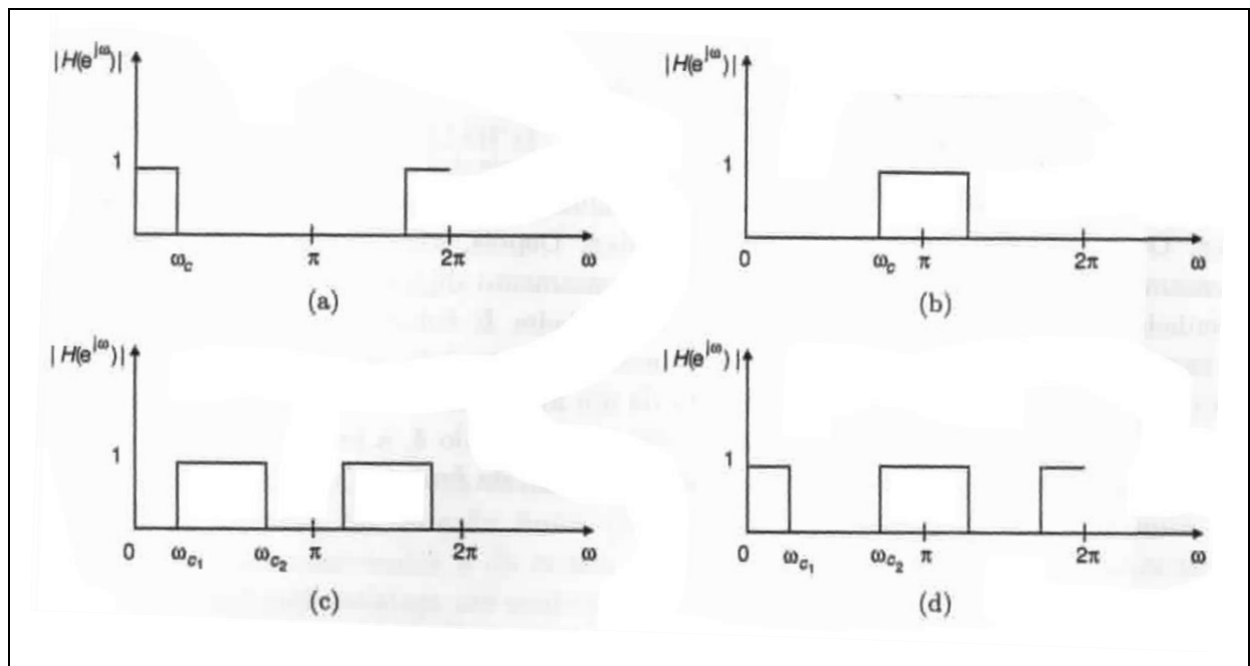
Fonte: Diniz et al. (2004).

A tabela 2 apresenta as características ideais na frequência e resposta ao impulso para filtros passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa⁶. A figura 25 apresenta as respostas de módulo ideais para os filtros citados.

Um filtro FIR de fácil implementação e de reduzido custo computacional é o filtro média móvel, Diniz et al. (2004, p. 160-195), cujo cálculo utiliza um determinado número de pontos anteriores e posteriores para compor a média do ponto atual, como apresentado na equação 25.

⁶ A frequência de corte é representada por ω_c na tabela 2 e na figura 22.

Figura 25 - Resposta de módulo ideais para os filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-altas, (c) passa-faixa e (d) rejeita-faixa.



Fonte: Diniz et al. (2004).

Tabela 2 - Características ideais na frequência e respectivas respostas ao impulso para filtros passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita faixa.

Tipo de filtro	Resposta de módulo $ H(e^{j\omega}) $	Resposta ao impulso $h(n)$
Passa-baixas	$\begin{cases} 1, & \text{para } 0 \leq \omega \leq \omega_c \\ 0, & \text{para } \omega_c < \omega \leq \pi \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{\omega_c}{\pi}, & \text{para } n = 0 \\ \frac{1}{\pi n} \text{sen}(\omega_c n), & \text{para } n \neq 0 \end{cases}$
Passa-altas	$\begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq \omega < \omega_c \\ 1, & \text{para } \omega_c \leq \omega \leq \pi \end{cases}$	$\begin{cases} 1 - \frac{\omega_c}{\pi}, & \text{para } n = 0 \\ -\frac{1}{\pi n} \text{sen}(\omega_c n), & \text{para } n \neq 0 \end{cases}$
Passa-faixa	$\begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq \omega < \omega_{c1} \\ 1, & \text{para } \omega_{c1} \leq \omega \leq \omega_{c2} \\ 0, & \text{para } \omega_{c2} < \omega \leq \pi \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{(\omega_{c2} - \omega_{c1})}{\pi}, & \text{para } n = 0 \\ \frac{1}{\pi n} [\text{sen}(\omega_{c2} n) - \text{sen}(\omega_{c1} n)], & \text{para } n \neq 0 \end{cases}$
Rejeita-faixa	$\begin{cases} 1, & \text{para } 0 \leq \omega \leq \omega_{c1} \\ 0, & \text{para } \omega_{c1} < \omega < \omega_{c2} \\ 1, & \text{para } \omega_{c2} \leq \omega \leq \pi \end{cases}$	$\begin{cases} 1 - \frac{(\omega_{c2} - \omega_{c1})}{\pi}, & \text{para } n = 0 \\ \frac{1}{\pi n} [\text{sen}(\omega_{c1} n) - \text{sen}(\omega_{c2} n)], & \text{para } n \neq 0 \end{cases}$

Fonte: Diniz et al. (2004, p. 202).

Se for conhecida a frequência do sinal interferente, este pode ser eliminado ajustando-se a janela de amostragem do filtro media-móvel ao valor do período da interferência ou a um múltiplo deste período.

$$y[n] = \frac{1}{M_2 - M_1 + 1} \sum_{k=M_1}^{M_2} x[n + k] \quad (25)$$

Onde:

y: saída do filtro;

x: entrada do filtro;

M₁: número de dados anteriores ao atual;

M₂: número de dados posteriores ao atual.

Há também os filtros recursivos, cuja função de transferência está apresentada através da equação 26. A figura 26 apresenta a realização de um filtro IIR, Diniz et al. (2004).

$$H(z) = \frac{N(z)}{D(z)} = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=0}^M a_i z^{-i}} \quad (26)$$

Onde:

H(z): função de transferência;

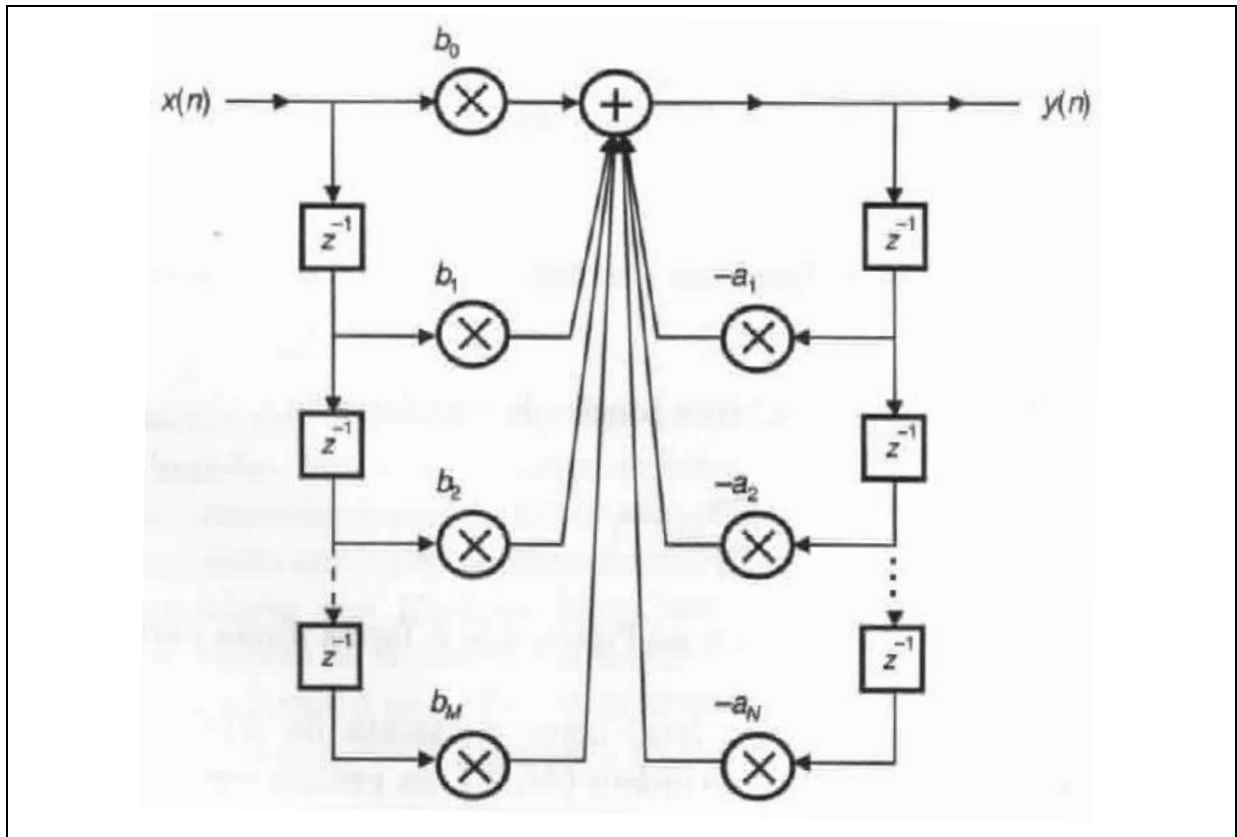
N(z): polinômio que compõe o numerador da resposta ao impulso;

D(z): polinômio que compõe o denominador da resposta ao impulso;

a: componentes de 1/D(z);

b: componentes de N(z).

Figura 26 - Realização em forma direta IIR não-canônica.



Fonte: Diniz et al. (2004).

Em geral o comportamento de um filtro é caracterizado por sua resposta em frequência $H(e^{j\omega})$, vide equação 27, porém devido a relação entre $H(e^{j\omega})$ e $h[n]$ pode-se escrever também a equação 28.

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h(n)e^{-j\omega n} \quad (27)$$

$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega \quad (28)$$

Onde:

H: função de transferência;

Y: saída do filtro;

X: entrada do filtro;

h: resposta ao impulso.

Em resumo, os filtros digitais⁷ podem ser classificados da forma mostrada na tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de filtros e respectivas aplicações.

		Filtro Implementado por:	
		Convolução FIR	Recursão IIR
Aplicação:	Domínio do Tempo (suavização, remoção de componentes CC)	Média móvel	Pólo simples
	Domínio da Frequência (Separar frequências)	Janelamento Sinc	Chebyshev
	Personalizado (Deconvolução)	FIR personalizado	Design Iterativo

Fonte: Adaptado de JANECHO (2009).

5.5 Autocorrelação e densidade espectral de potência

Existem processos que não podem ser representados por uma função matemática, ou seja, não são determinísticos, já que o valor assumido em um certo instante t não pode ser determinado com exatidão, pois o sistema se comporta de forma aleatória, como o apresentado na figura 27, por exemplo.

Neste caso, é comum o emprego de ferramentas estatísticas, como a função densidade de probabilidade (f.d.p.), Newland (1983, p. 40-51), que indica a probabilidade do sinal $x(t)$ assumir valores dentro de uma determinada faixa (de x a $x+dx$) para um determinado instante de tempo t_0 , vide equação 29.

$$Prob(x \leq x(t_0) \leq x + dx) = p(x)dx \quad (29)$$

Onde:

x : sinal;

$Prob(x \leq x(t_0) \leq x + dx)$: Fração do tempo por ciclo durante o qual $x(t)$ assume um valor dentro da

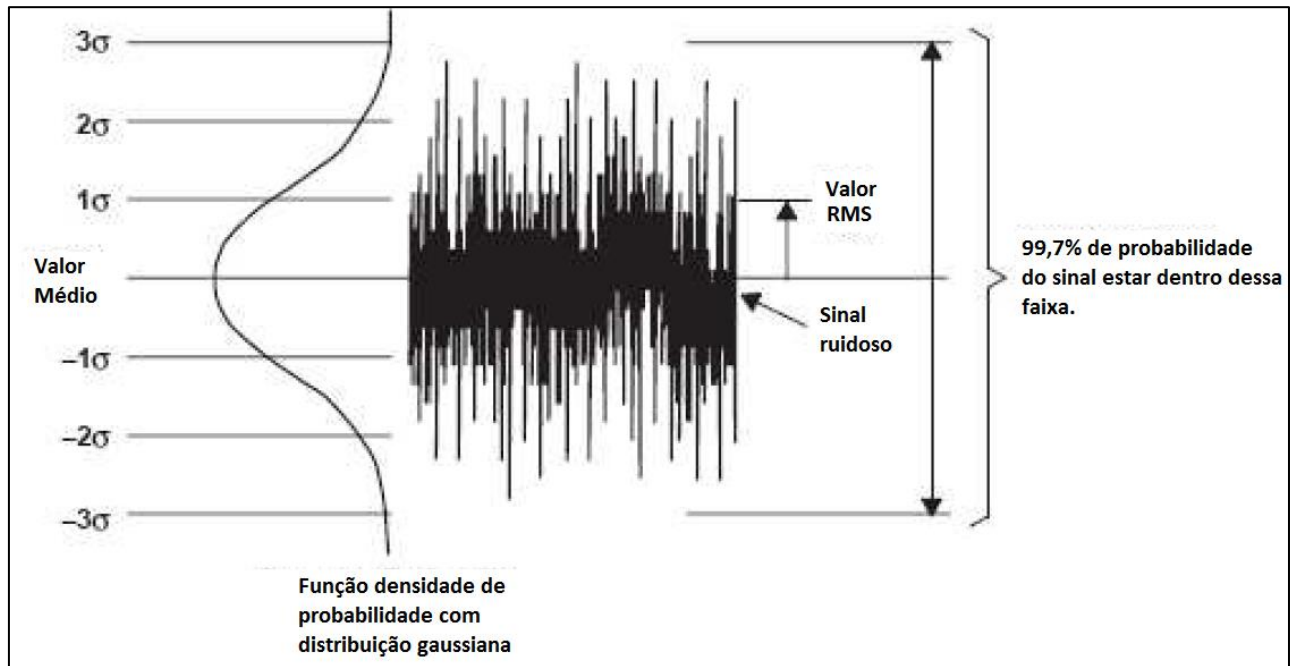
⁷ Neste estudo foi empregado o filtro média móvel.

faixa de valores compreendida entre x
e $x+dx$;

t_0 : instante no qual se deseja fazer a análise;

$p(x)$: função densidade de probabilidade.

Figura 27 - Sinal aleatório.



Fonte: Simões (2005).

Uma vez conhecida a função densidade de probabilidade $p(k)$ do sinal aleatório $x(t)$ é possível calcular certas características estatísticas do sinal, vide Newland (1983, p. 40-51), como o valor médio de x , também conhecido como esperança matemática - $E[x]$, a equação 30 apresenta o cálculo da esperança de x para sinais contínuos e a equação 31 para sinais discretos.

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \quad (30)$$

$$E[X] = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p(x_i) \quad (31)$$

Onde:

$E[x]$: esperança;

x : sinal aleatório;

$p(x)$: função densidade de probabilidade de x .

Outro conceito extremamente útil é a autocorrelação, trata-se da correlação cruzada de um sinal, Newland (1983, p. 40-51). Esta ferramenta matemática representa o quanto um sinal é capaz de assumir o mesmo valor entre dois instantes espaçados por um tempo τ , ou seja, identificando um padrão de repetição entre amostras espaçadas em τ uma da outra. Ou seja, sendo $x(t)$ um sinal determinístico, sua função de autocorrelação será definida pela equação 32 a seguir.

$$R_X(\tau) = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_{-t_0/2}^{+t_0/2} x(t + \tau)x(t)dt \quad (32)$$

Onde:

R_x : autocorrelação;

x : sinal;

τ : deslocamento no tempo;

t : tempo.

Se $x(t)$ for um sinal periódico com período T a sua função de autocorrelação, também é periódica com o mesmo período, como apresentado na equação 33.

$$R_X(\tau) = \frac{1}{T} \int_{t'}^{t'+T} x(t + \tau)x(t)dt \quad (33)$$

Para sinais aleatórios estacionários, cujo valor médio é constante e função de autocorrelação só depende do intervalo de tempo τ , a autocorrelação é dada pela equação 34.

$$R_X(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)] \quad (34)$$

A densidade espectral de potência de $x(t)$ é a transformada de Fourier da função de autocorrelação (teorema de Wiener-Khintchine), equação 35.

$$S_X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_X(\tau)e^{-j\omega\tau}d\omega \quad (35)$$

Onde:

S_x : Densidade espectral de potência;

ω : frequência angular.

Portanto, a transformada de Fourier inversa de $S_x(f)$ leva a $R_x(\tau)$. A potência média do sinal é igual ao valor da sua função de autocorrelação na origem ($\tau = 0$), vide equação 36.

$$P = R_x(0) = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) e^{j2\omega\tau} d\omega \right]_{\tau=0} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\omega) d\omega \quad (36)$$

Onde:

P: potência média do sinal;

5.6 Ruído

Com base em Franco (2002), Simões (2005) e De Souza e Dall'aglio Sobrinho (2008), ruído pode ser definido como um sinal sem relação alguma com o sinal desejado, de caráter aleatório e indesejado que interfere nos valores das medidas, limitando assim, a exatidão do sistema de instrumentação. As causas⁸ mais comuns de ruído são:

- Ruído térmico
 - É causado pela agitação térmica de elétrons ou outros transportadores de cargas em resistores, capacitores, transdutores de radiação, células eletroquímicas e outros elementos resistivos em um instrumento;
- Ruído Shot (ou quântico)
 - Ocorre quando elétrons ou outras partículas carregadas atravessam a junção PN de componentes semicondutores;
- Ruído Flicker

⁸ O ruído observado em um processo pode ocorrer devido a uma dessas causas ou pode ser resultado da combinação entre dois ou mais fatores mencionados.

- É caracterizado por ter uma magnitude inversamente proporcional à frequência do sinal que está sendo observado, como consequência, algumas vezes é chamado de ruído 1/f, está sempre associado à correntes d.c.;
- Ruído Burst (popcorn noise)
 - Aparece devido a imperfeições no material semicondutor e pelos implantes de íons pesados;
- Ruído transmitido
 - Recebido com o sinal original (às vezes gerado dentro do próprio transdutor) e não há como distinguir um do outro;
- Ruído por imperfeições no processo
 - Originado por mau contato em pontos de solda ou efeito triboelétrico.

Há uma relação utilizada para avaliar a magnitude do ruído, denominada de relação sinal/ruído (RSR, ou do inglês, Signal to Noise Ratio – SNR), Newland (1983), dada em dB pela equação 37.

$$RSR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_s}{V_r} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_r} \right) \quad (37)$$

Onde:

RSR : Relação Sinal/Ruído;

Vs: tensão (rms) do sinal na saída;

Vr: tensão (rms) do ruído;

Ps: tensão (rms) do sinal na saída;

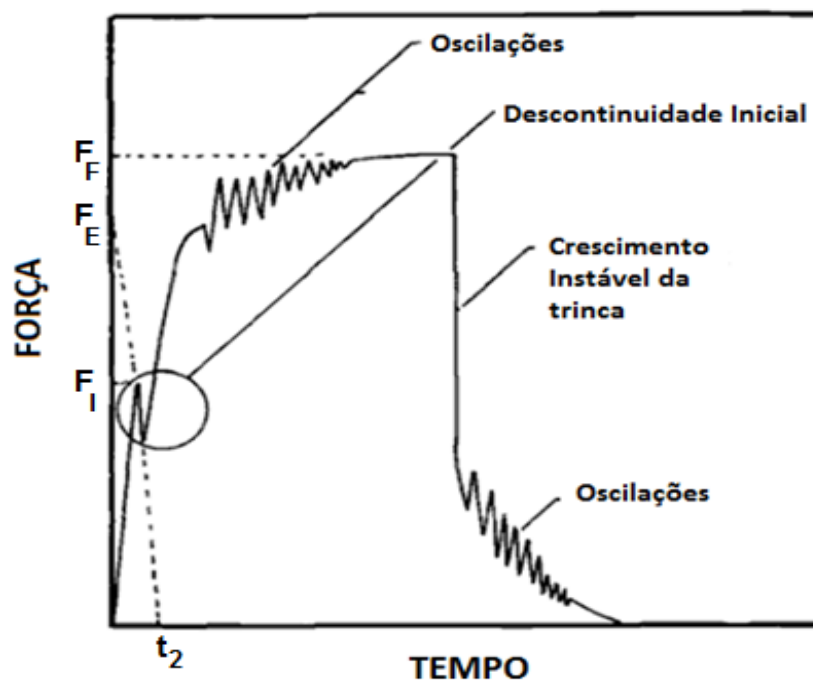
Pr: tensão (rms) do ruído.

6 EFEITOS DINÂMICOS SOBRE A CURVA FORÇA VS TEMPO

O estudo realizado por Venzi et al. (1969) afirmam que a curva *força vs tempo* sofre influência de efeitos dinâmicos ao longo do ensaio, que por sua vez tornam os cálculos de tenacidade à fratura imprecisos.

Venzi et al. apresentam em seu estudo alguns comportamentos observados com frequência nas curvas força vs tempo obtidas através do ensaio de impacto instrumentado, vide figura 28. Neste estudo o sistema composto pelo martelo, corpo de prova e apoio foi modelado através de um sistema massa-mola, vide figura 29, a fim de criar um fator de correção para eliminar estas interferências.

Figura 28 - Comportamentos frequentemente observados na curva *força vs tempo*.



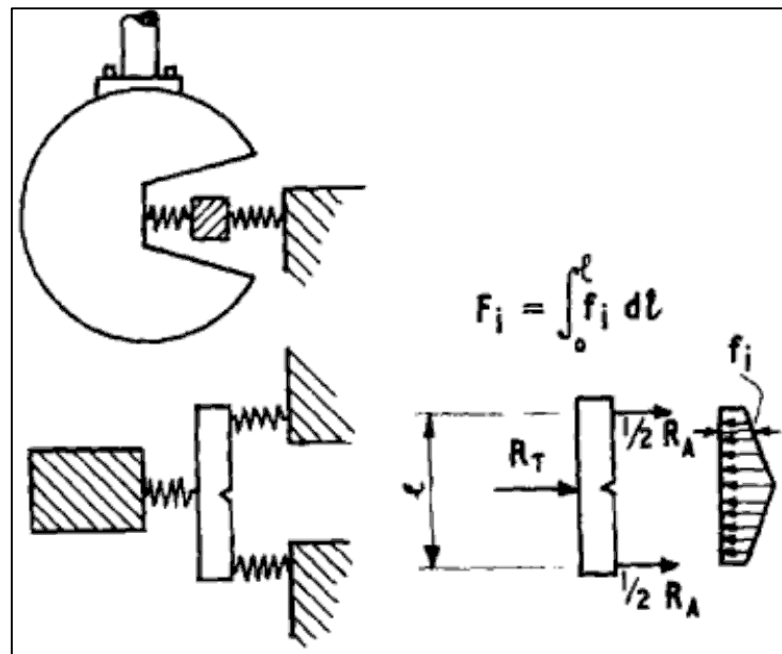
Fonte: Venzi et al. (1969).

Venzi et al. chegaram a conclusão de que durante o carregamento inicial (nos primeiros instantes do impacto) não há uma relação clara entre o carregamento no cutelo e apoio. Porém, à medida que o carregamento vai crescendo, observa-se uma interação entre apoio, martelo e corpo de prova.

Observa-se um carregamento L_T no martelo (reação devido ao contato com o corpo de prova), um carregamento no apoio L_A (devido ao contato com o corpo de prova). Então, notar-se-á uma reação do corpo de prova em relação a esses dois,

sendo R_T a reação em relação ao martelo e R_A em relação ao corpo de apoio. O carregamento resultante sobre o corpo de prova é dado por L_S , cujo valor é dado pela equação 38 segundo Venzi et al. (1969).

Figura 29 - Representação esquemática do ensaio Charpy através de um sistema massa-mola, com detalhe para o cálculo do carregamento distribuído ao longo do comprimento do corpo de prova.



Fonte: Venzi et al. (1969).

$$L_S = \frac{L_T + L_A + (R_T - R_A)}{2} \quad (38)$$

Onde:

L_S : carregamento no corpo de prova;

L_T : carregamento no cutelo;

L_A : carregamento no apoio;

R_T : reação do martelo;

R_A : reação do apoio.

Além disso, Venzi et al. (1969) também apresentam uma metodologia para determinar a frequência natural do sistema composto pela máquina de ensaio de

impacto e corpo de prova, dado pela equação 39. Este também afirma que a tensão de fratura poderia ser calculada baseada no tempo de fratura do corpo de prova.

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_e}{M_e}} \quad (39)$$

Onde:

n : frequência natural do sistema;

S_e : constante de mola equivalente do sistema;

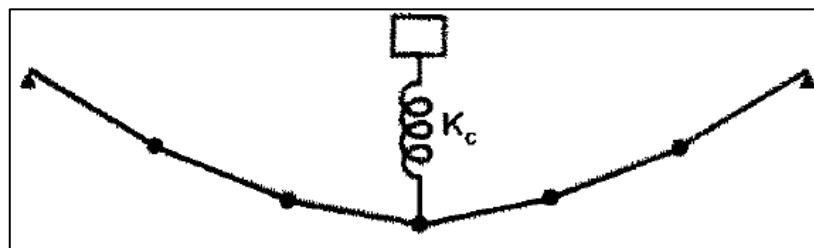
M_e : massa equivalente do sistema.

Posteriormente outros pesquisadores seguiram a mesma linha de raciocínio.

Williams e Adams (1987) afirmam que o método tradicional utilizado para estimar o deslocamento possui uma pequena margem de erro, enquanto o carregamento medido possui uma margem de erro significativo. Também afirma que a filtragem do sinal era algo altamente nocivo para a interpretação física do fenômeno, pois haveria perda de informação.

Sahraoui e Lataillade (1990) tentaram fazer um análise nodal, modelando o corpo de prova como nove pequenas massas concentradas e igualmente distribuídas ao longo do comprimento do corpo de prova, o modelo também considera a rigidez de contato k_c entre cutelo e corpo de prova, conforme apresentado na figura 30. Segundo os autores, a metodologia apresentada seria bastante útil durante o desenvolvimento de uma análise por elementos finitos.

Figura 30 - Modelagem do sistema martelo e corpo de prova proposto por Sahraoui e Lataillade.



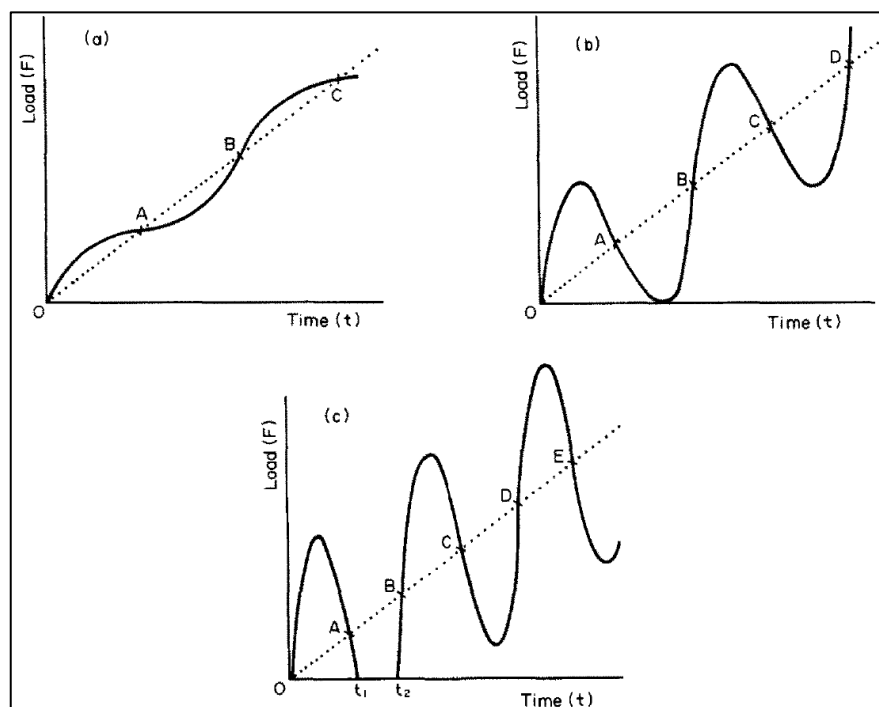
Fonte: Sahraoui e Lataillade (1990).

Sahraoui e Lataillade (1990) concluíram através do estudo citado, que os efeitos inerciais, introduzidos pelo segundo modo de vibração, são consideráveis no início do impacto, pois podem aumentar ou diminuir o carregamento de contato, sendo necessário aplicar um fator de correção.

O carregamento obtido no ensaio não pode ser aplicado diretamente no cálculo da tenacidade à fratura, antes seria necessário aplicar um fator de forma, porém isso não seria necessário se quando houvesse uma reduzida rigidez de contato.

Também são apresentados gráficos comparativos, que apresentam o efeito da variação na relação entre a rigidez de contato (K_c) e a rigidez à flexão do corpo de prova bi-apoiado (K_b), vide figura 31, que levaria a uma seleção criteriosa da máquina de ensaio no que diz respeito às propriedades mecânica do material a ser testado.

Figura 31 - Oscilações na curva *força vs tempo*: (a) $K_c/K_b = 1$, (b) $K_c/K_b = 5$ e (c) $K_c/K_b = 10$.



Fonte: Sahraoui e Lataillade (1990).

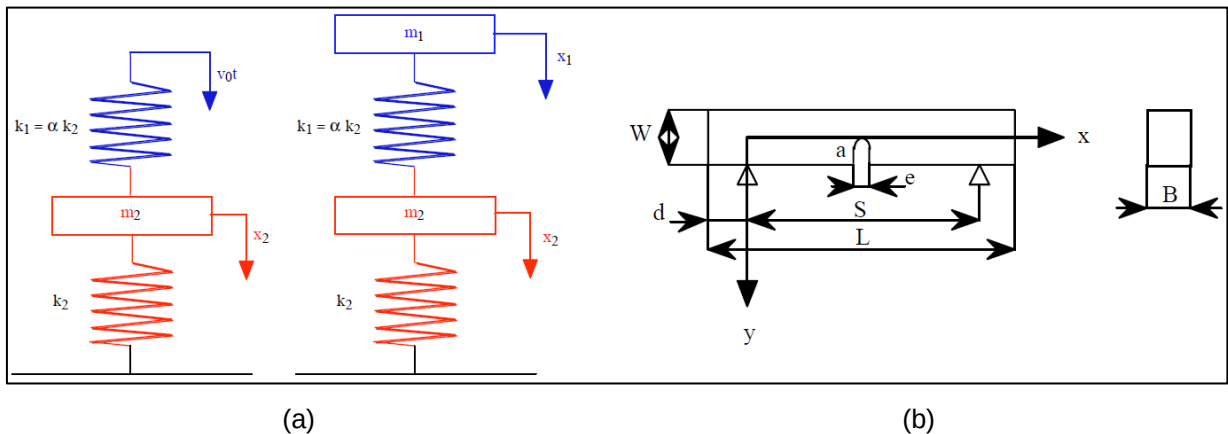
Lorriot et al. (1998) afirma que estas oscilações sobrepostas ao sinal dependem da velocidade inicial do martelo pendular e, também, que a rigidez de contato, usada no modelo massa-mola (com um ou dois graus de liberdade), pode

ser estimada através do ensaio de flexão ou por um método de medição do deslocamento utilizando um transdutor que não tenha contato físico com o sistema, por isso Lorriot et al. propôs o uso de um interferômetro a laser.

O modelo adotado por Lorriot et al. (1998) e as notações empregadas estão apresentadas na figura 32. Neste estudo afirma-se que existe uma relação entre a rigidez k_1 e a k_2 , onde $k_1 = \alpha \cdot k_2$, onde α é uma constante. São adotadas as seguintes notações: **a** é o comprimento inicial da pré-trinca, **W** é a largura do corpo de prova, **B** a espessura, **L** o comprimento do corpo de prova, **d** comprimento da extremidade do corpo de prova até o apoio, **S** a distância entre os apoios na máquina de ensaio.

No trabalho de Lorriot et.al. (1998) são feitas as deduções das equações do deslocamento e da força a partir dos modelos massa-mola com 1 e com 2 graus de liberdade, porém o presente trabalho tem interesse em verificar experimentalmente influência dos parâmetros envolvidos. Portanto, são apresentadas as soluções das equações diferenciais ordinárias (EDOs) que regem o modelo.

Figura 32 - (a) Sistemas massa-mola com 1 e com 2 graus de liberdade e (b) geometria do corpo de prova.



Fonte: Lorriot et al. (1998).

Para o sistema com um grau de liberdade tem-se a EDO apresentada na equação 40 e ao aplicar as condições de contorno $x_2(0) = 0$ e $\dot{x}_2(0) = 0$ tem-se a equação 41 para o deslocamento e as equações 42 e 43 para o carregamento. Onde o índice 1 refere-se ao martelo e 2 ao corpo de prova.

$$\ddot{x}_2 + (\alpha + 1)\omega_s^2 x_2 = \alpha \omega_s^2 v_0 t \quad (40)$$

$$x_2 = \frac{\alpha}{\alpha + 1} v_0 \left(t - \frac{\sin \omega_2 t}{\omega_2} \right) = x_{21} t - x_{22} \sin \omega_2 t \quad (41)$$

$$P_1 = k_1(v_0 t - x_2) = \frac{\alpha}{\alpha + 1} k_2 v_0 \left(t + \frac{\alpha}{\omega_2} \sin \omega_2 t \right) = P_{11} t + P_{12} \sin \omega_2 t \quad (42)$$

$$P_2 = k_2 x_2 = \frac{\alpha}{\alpha + 1} k_2 v_0 \left(t - \frac{\sin \omega_2 t}{\omega_2} \right) = P_{21} t - P_{22} \sin \omega_2 t \quad (43)$$

Para o sistema com dois grau de liberdade tem-se a EDO apresentada na equação 44 e 45, aplicando-se as condições de contorno $x_1(0) = 0$, $\dot{x}_1(0) = v_0$, $x_2(0) = 0$ e $\dot{x}_2(0) = 0$ tem-se as equações 46 e 47 para o deslocamento e as equações 48 e 49 para o carregamento.

$$\ddot{x}_1 + \frac{\alpha}{M} \omega_s^2 x_1 = \frac{\alpha}{M} \omega_s^2 x_2 \quad (44)$$

$$\ddot{x}_2 + (\alpha + 1) \omega_s^2 x_2 = \alpha \omega_s^2 x_1 \quad (45)$$

$$x_1 = v_0(\alpha + 1) \frac{1 - M \left(\frac{\alpha+1}{\alpha} \right) \frac{\sin \omega_1 t}{\omega_1}}{1 - M \frac{(\alpha+1)^2}{\alpha}} - \frac{\alpha v_0}{1 - M \frac{(\alpha+1)^2}{\alpha}} \frac{\sin \omega_2 t}{\omega_2} \quad (46)$$

$$x_2 = v_0 \alpha \frac{1 - M \left(\frac{\alpha+1}{\alpha} \right) \left(\frac{\sin \omega_1 t}{\omega_1} - \frac{\sin \omega_2 t}{\omega_2} \right)}{1 - M \frac{(\alpha+1)^2}{\alpha}} = x_{21} \sin \omega_1 t - x_{22} \sin \omega_2 t \quad (47)$$

$$\begin{aligned} P_1 &= \alpha k_2 v_0 \frac{1 - M \left(\frac{\alpha+1}{\alpha} \right) \frac{\sin \omega_1 t}{\omega_1}}{1 - M \frac{(\alpha+1)^2}{\alpha}} - \alpha k_2 v_0 \frac{M(\alpha + 1)}{1 - M \frac{(\alpha+1)^2}{\alpha}} \frac{\sin \omega_2 t}{\omega_2} \\ &= P_{11} \sin \omega_1 t - P_{12} \sin \omega_2 t \end{aligned} \quad (48)$$

$$P_2 = k_2 x_2 = k_2 v_0 \alpha \frac{1 - M \left(\frac{\alpha+1}{\alpha} \right)}{1 - M \frac{(\alpha+1)^2}{\alpha}} \left(\frac{\sin \omega_1 t}{\omega_1} - \frac{\sin \omega_2 t}{\omega_2} \right) = P_{21} \sin \omega_1 t - P_{22} \sin \omega_2 t \quad (49)$$

Onde:

x_1 : deslocamento do martelo;

x_2 : deslocamento do corpo de prova;

P_1 : carregamento sobre a massa 1 (martelo);

P_2 : carregamento sobre a massa 2 (corpo de prova);

k_1 : rigidez de contato (cutelo e corpo de prova);

k_2 : rigidez do corpo de prova à flexão (corpo de prova e apoio);

α : relação entre a rigidez 1 e 2;

u_0 : velocidade do martelo;

M : m_1/m_2 (razão entre massa do martelo e massa do corpo de prova)

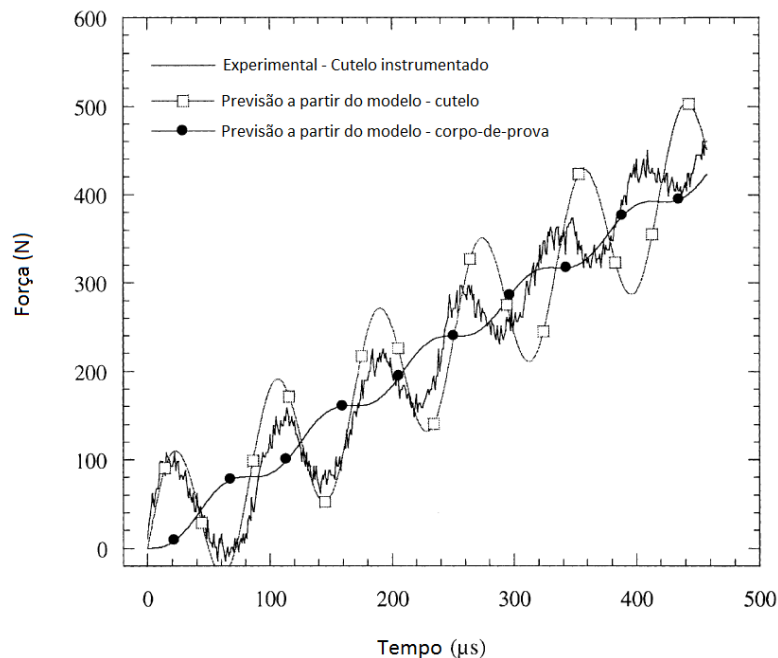
t : tempo.

Alguns anos mais tarde, Landrein et al. (2001) dão continuidade a este estudo e apresentam as curvas da figura 33, que comparam a força obtida experimentalmente, captada pelo cutelo instrumentado, e as previstas pelo modelo que admite dois graus de liberdade.

A principal intenção em modelar a máquina de ensaio Charpy através de um sistema massa-mola é a de comparar a resposta do modelo com as flutuações nos sinais, se houver correspondência então se sabe que a causa está na vibração do conjunto. Havendo um modelo que descreva o estado de vibração observado é possível neutralizar as interferências matematicamente, permitindo um tratamento sem a necessidade de empregar filtros digitais.

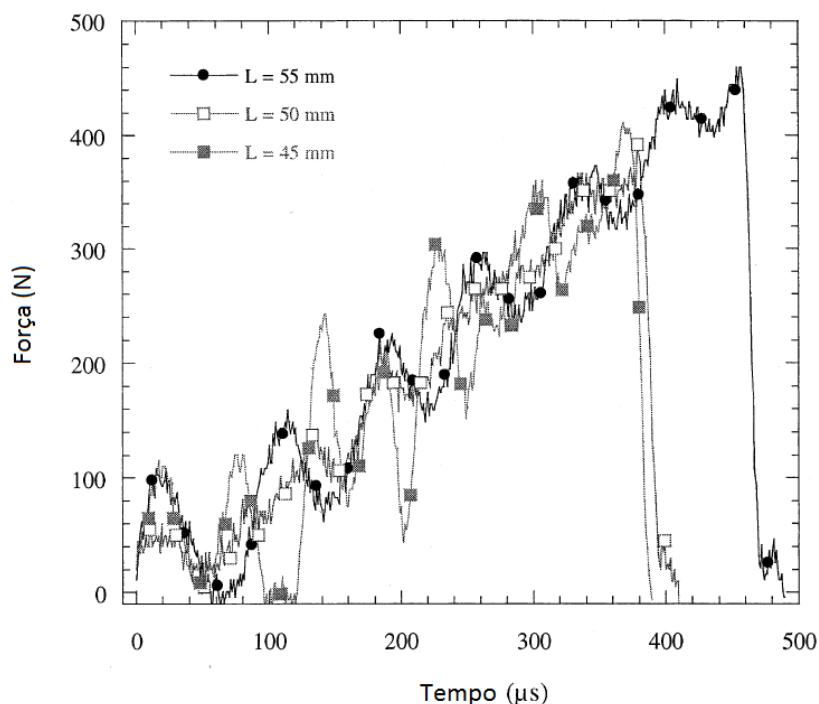
Além disso, as curvas da figura 34 mostram o efeito do comprimento do corpo de prova sobre as curvas *força vs deslocamento* em amostras de PMMA com entalhe-V e pré-trincadas. O gráfico sugere que as amostras de maior comprimento apresentam curvas de maior área e com flutuações de menor magnitude em relação as das amostras de menor comprimento.

Figura 33 - Curva *força vs deslocamento* obtida experimentalmente e prevista através da simulação numérica (PMMA, $k_2 = 1.12 \times 10^6$ N/m, $m_2 = 1.74$ g, $m_1 = 1$ kg, $\alpha = 6.9$, $u_0 = 1$ m/s, $a/W = 0,3$).



Fonte: Landrein et al. (2001).

Figura 34 - Curvas *força vs deslocamento* em amostras de diferentes comprimentos, com entalhe-V e com pré-trinca ($a/W=0,3$) obtidas através do ensaio de impacto Charpy instrumentado.



Fonte: Landrein et al. (2001).

7 ALTERAÇÃO DA FLEXIBILIDADE E TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA

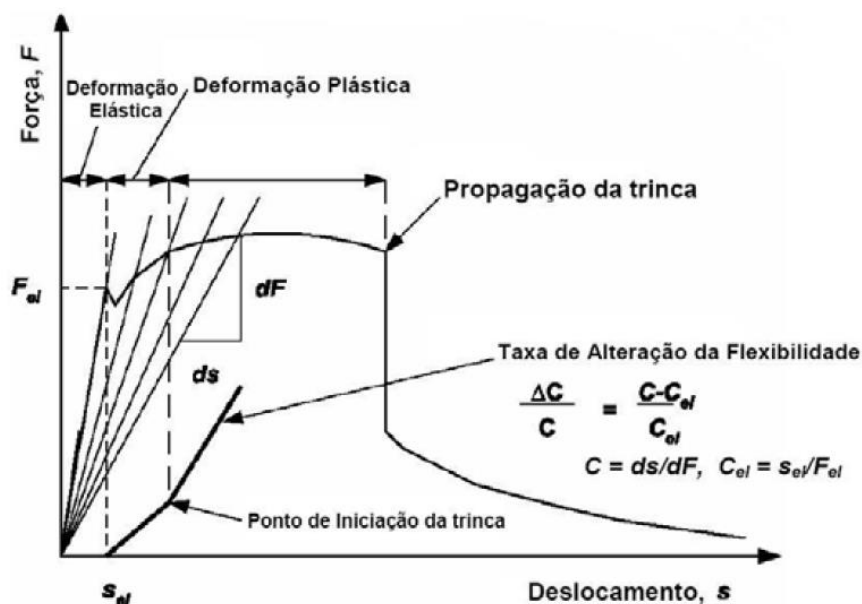
Segundo Angamuthu et al. (1999) foram desenvolvidos dois métodos para estimar o valor da tenacidade à fratura dinâmica, um deles apropriado para materiais que exibem um comportamento intrinsecamente dúctil (J_{Id}) e outro para os essencialmente frágeis (K_{Id}).

Yamamoto e Kobayashi (1993) apresentaram a metodologia chamada de *compliance change rate*, dada pela relação $\Delta C/C$ mostrada na equação 40 e sua implicação na figura 35, representa-se por C o coeficiente elástico aparente do material e C_{el} o coeficiente elástico.

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C - C_{el}}{C_{el}} \quad (40)$$

Durante a deformação elástica do material $C = C_{el}$ e, portanto, o gradiente $\Delta C/C$ permanece nulo, quando o material começa a se deformar plasticamente este se torna menos rígido e o gradiente começa a crescer de forma incremental sendo guiado pelo expoente de encruamento do material, quando a trinca se inicia o valor do gradiente começa a apresentar acréscimos mais expressivos do que os observados durante a deformação elástica.

Figura 35 - Método da alteração da taxa de flexibilidade.



Fonte: Yamamoto e Kobayashi (1993).

Quando a trinca se inicia ocorre antes da força atingir seu ponto máximo, no escoamento máximo do espécime é possível, de acordo com os princípios da mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP), estimar o valor de J_{Id} através da equação 41.

$$J_{Id} = \frac{2E_i}{B(W-a)} \quad (41)$$

Onde:

W: largura do corpo de prova;

B: espessura do corpo de prova;

a: comprimento inicial da pré-trinca;

E_i : energia necessária para iniciação da trinca;

J_{Id} : tenacidade à fratura do material na presença de uma trinca.

Quando a trinca se inicia no carregamento máximo, sem haver um escoamento generalizado, a mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) é utilizada para determinar o valor de K_{Id} , dado pelas equações 42 e 43, para os casos em que há a ocorrência de fratura frágil.

$$K_{Id} = \frac{6YM(a)^{0,5}}{BW^2} \quad (42)$$

$$Y = 1,93 - 3,07 \left(\frac{a}{W}\right) + 14,53 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25,11 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25,8 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (43)$$

Onde:

W: largura do corpo de prova;

B: espessura do corpo de prova;

a: comprimento inicial da pré-trinca;

S: distância entre os pontos de apoio na máquina de ensaio;

E_i : energia necessária para iniciação da trinca;

M: momento fletor aplicado;

K_{Id} : tenacidade à fratura pelo modo de deslocamento I dinâmico.

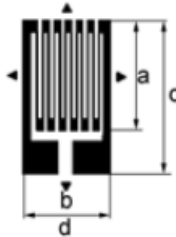
8 MATERIAIS E MÉTODOS

8.1 Extensômetros utilizados

Os extensômetros colados nos martelos são do tipo PA-06-062AG-350-L da Excel Sensores Ltda., cujo fator de sensibilidade (gage factor, K) teoricamente é igual a 2,1. As características desse modelo de extensômetro estão apresentadas na tabela 4.

O método de colagem do extensômetro está detalhado no Anexo E deste estudo.

Tabela 4 - Especificações dos extensômetros empregados neste estudo.

Materiais da base e do filme metálico	PA	Base de Polyimida com filme metálico de constantan		
Auto-compensação de temperatura (compensação em ppm/°F)	06	Para aço		
Comprimento ativo da grela (codificado em um número indicando 1/1.000 de polegadas)	062	-		
Forma geométrica 	AG	Dimensões (em mm)	a	1,57
			b	1,55
			c	3,07
			d	1,55
Resistência elétrica (em Ohm)	350	-		
Opcionais	L	Com fios de cobre soldados nos terminais		

Fonte: Excel Sensores (201-?).

8.2 Confeção dos corpos de prova

Foram confeccionados corpos de prova (CPs) com os seguintes aços: SAE 1040, SAE 1020, API X70, ABNT 4340.

O material como recebido foi cortado utilizando a serra de retorno rápido na Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade (DEM) de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) – UNESP.

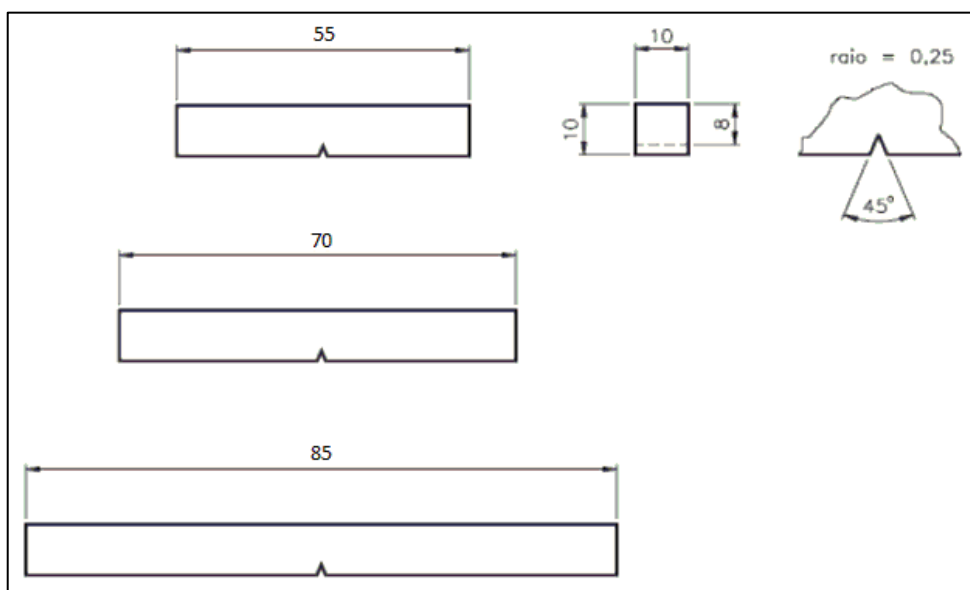
Em seguida, as amostras foram levadas à plaina, de modo que as barras ficassem com uma seção quadrada de 10 x 10 mm aproximadamente. Então, as barras com 120 mm de comprimento foram divididas ao meio utilizando serra PoliCort do Laboratório de Preparação de Amostras – DEM – UNESP/campus de Ilha Solteira a aproximadamente 59 mm de comprimento.

Para que os corpos de prova atingissem os 55 mm de comprimento como exigido pela norma ABNT E-23 (1996), as barras foram faceadas em um torno da Oficina Mecânica do DEM-FEIS (UNESP). Então, as faces dos corpos de prova foram retificadas para que atingissem as medidas exatas de 10 x 10 mm.

Por fim, foram feitos os entalhes do tipo A, com configuração em V, ângulo de 45°, profundidade de 2 mm e raio de ponta de 0,25 mm. Tal usinagem foi feita na fresadora universal do DEM-FEIS (UNESP) utilizando uma fresa circular refrigerada e afiada na medida correta.

Este processo foi repetido, porém foram feitas alterações no comprimento dos corpos de prova, de modo a produzir amostras com 70 mm e com 85 mm, além daquelas em conformidade com a norma ASTM E-23 (1996), com 55 mm de comprimento, vide figura 36.

Figura 36 - Dimensões dos corpos de prova utilizados neste estudo.



Fonte: Baseado na norma ASTM E-23 (1996).

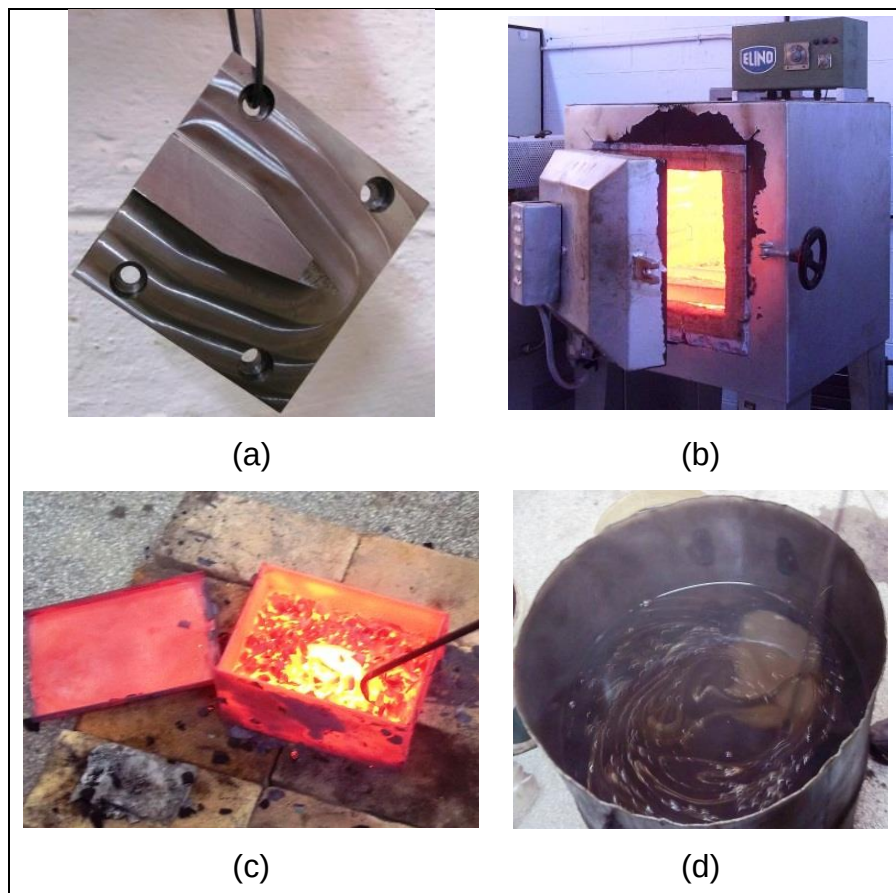
8.3 Confecção dos cutelos

Primeiramente foram cortados na serra de retorno rápido cilindros de 60 mm de altura e 155 mm de diâmetro, em seguida cortados novamente, produzindo prismas de dimensões 120 x 120 x 60 mm.

Então estes foram levados para o centro de usinagem ROMI Discovery D560 do GPU (Grupo de Usinagem – DEM – UNESP/campus de Ilha Solteira), a usinagem foi realizada utilizando uma rotina criada com base nos desenhos feitos no SolidWorks® 2011, vide Apêndice A.

O tratamento térmico dos cutelos foi realizado empregando um forno da marca Elino. Para fazer a têmpera foi necessário aquecer os cutelos a 900 °C por 3 h e, em seguida, foram retirados do forno e resfriados em óleo, vide figura 37. Os cutelos foram aquecidos a 250 °C por 2 h e resfriamento também foi feito em óleo.

Figura 37 - Têmpera: (a) cutelo antes do tratamento térmico, (b) forno a 900°C, (c) cutelo aquecido após permanecer por 3h no forno em um recipiente com grafita e (d) cutelo resfriado em óleo.

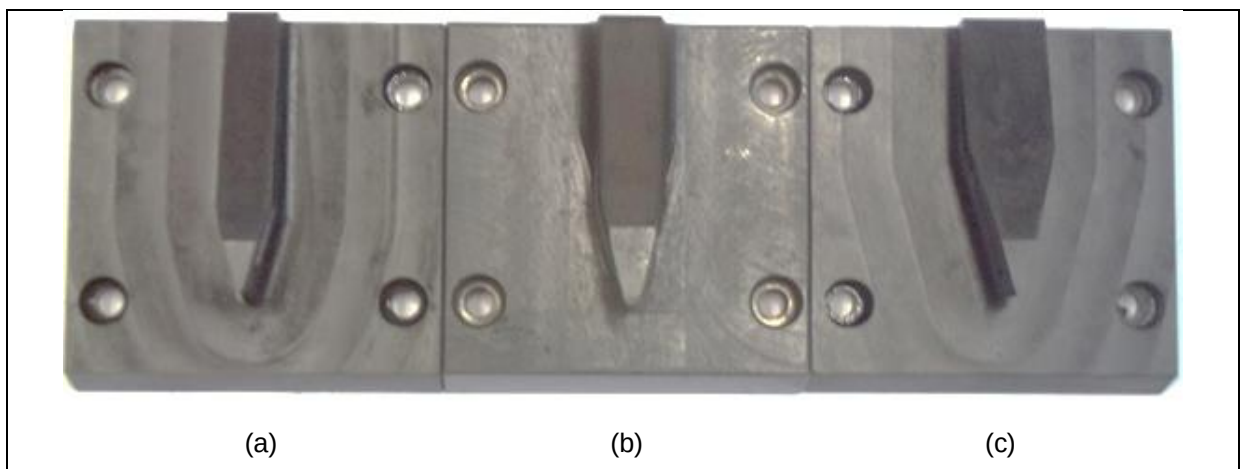


Fonte: Elaboração do autor.

As figuras 38 e 39 mostram os cutelos após o tratamento térmico.

O cutelo denominado de B, que foi instrumentado tem sido utilizado em diversos trabalhos anteriores, serviu como base para a confecção dos demais cutelos. A partir dele foi desenvolvido um cutelo com seção 25% menor, cutelo A – menor rigidez, e outro com seção com um aumento de 25%, cutelo C – maior rigidez.

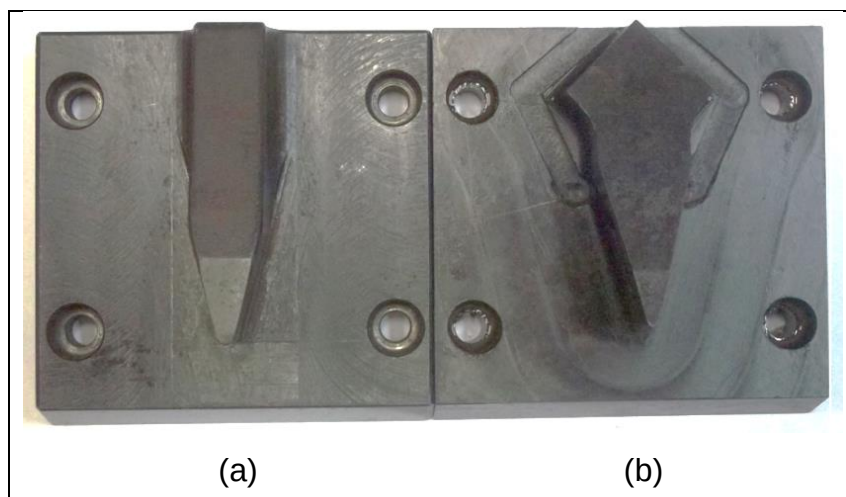
Figura 38 - Cutelos de (a) menor rigidez, (b) rigidez intermediária e (c) maior rigidez.



Fonte: Elaboração do autor.

Também foi gerado um cutelo com uma nova geometria (GC3M-II), cuja região oposta ao impacto possui um ângulo reto, assim como as regiões laterais, na tentativa de criar interferências destrutivas de modo a atenuar a onda de choque causada pelo impacto.

Figura 39 - Cutelos (a) de rigidez intermediária e (b) com nova geometria (GC3M-II).



Fonte: Elaboração do autor.

8.4 Cadeia de medição

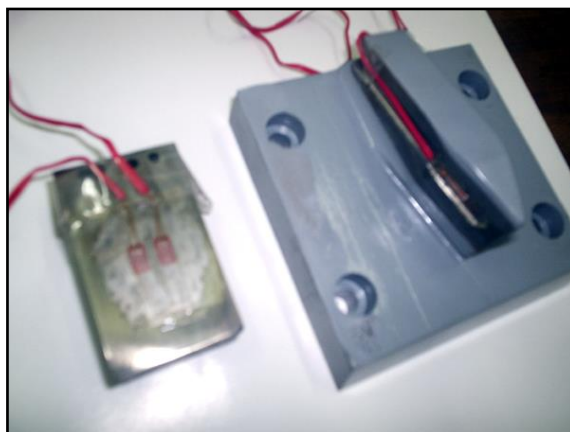
Os ensaios de impacto foram realizados em temperatura ambiente numa máquina convencional Charpy com capacidade de 300 J, marca Heckert, modelo 423/18, pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEM – UNESP/campus de Ilha Solteira. A máquina de ensaio apresentava a energia global de fratura através de um dial com precisão de 0,5 J. A massa do martelo era de 19,952 kg e liberada por um sistema de alavanca atingindo uma velocidade de impacto de 5,40 m/s.

De acordo com os procedimentos estabelecidos pela ISO 14.556 (2000), a medida da força é obtida através do uso de dois extensômetros elétricos, posicionados no martelo pendular para formar o transdutor de força, ou seja, este martelo foi transformado numa célula de carga.

Durante o impacto a deformação elástica no cutelo modifica a resistência dos extensômetros colados nele mesmo, que por sua vez causam um balanceamento na ponte de *Wheatstone* de extensômetros, essa diferença de potencial (d.d.p.) é amplificada e medida na saída dos terminais do condicionador de sinais (que nada mais é do que um amplificador de instrumentação alimentado por uma fonte de corrente contínua).

Dois dos extensômetros são sempre ativos e os outros dois isentos de carregamento, sendo fixados em uma peça livre de vibração durante todo o ensaio, sua função é compensar efeitos causados pela temperatura. A figura 40 mostra o cutelo instrumentado e respectivo compensador.

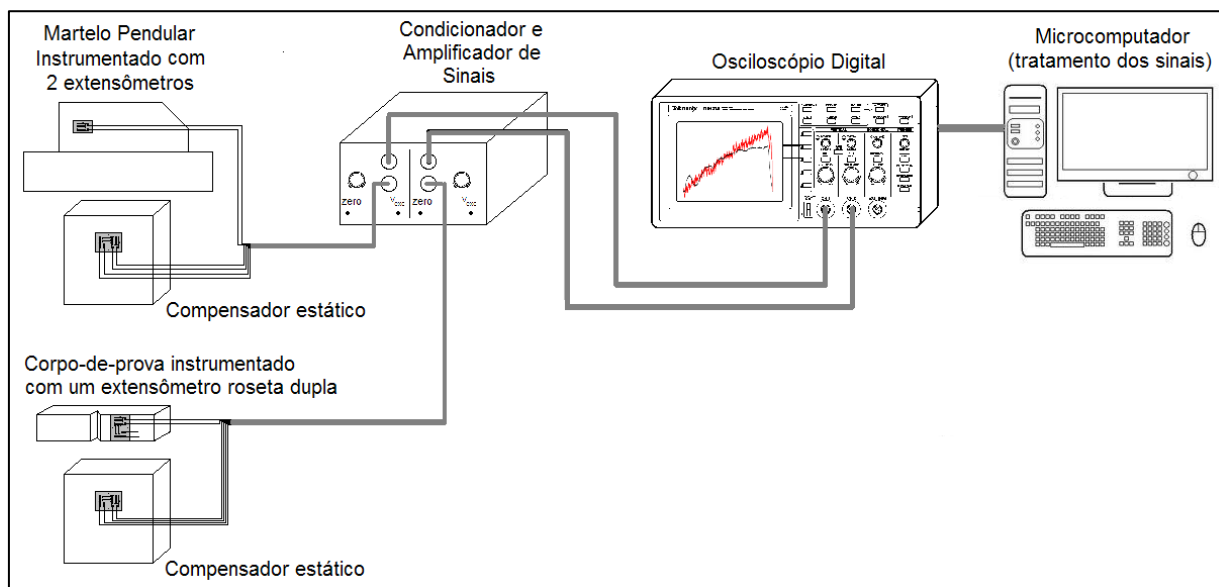
Figura 40 - Cutelo instrumentado e compensador estático.



Fonte: Rodrigues (2001).

A figura 41 apresenta um diagrama esquemático do sistema para aquisição dos sinais, que inclui o cutelo e/ou corpo de prova instrumentados (células de carga), amplificador de sinais e sistema de gravação do sinal, deverá ter uma resposta em frequência de, pelo menos, 100 kHz, com um tempo de subida correspondente não superior a 3,5 μ s.

Figura 41 - Arquitetura utilizada na aquisição simultânea de sinais com martelo e corpo de prova instrumentados.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

O sistema empregado neste estudo possui a curva do ganho em frequência apresentado na figura 42, ou seja, encontra-se em conformidade com a norma ISO 14.556 (2000).

Neste estudo foi utilizado um osciloscópio digital Tektronix® TDS220, utilizado para conversão A/D (amostragem) e visualização dos sinais, como apresentado na figura 41.

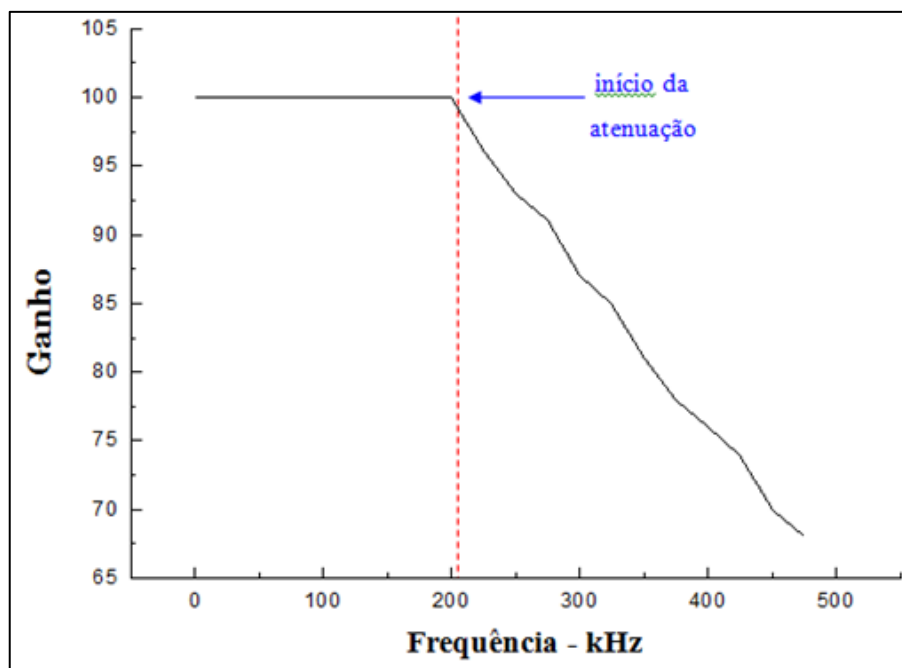
Assim como o osciloscópio digital, o condicionador de sinais empregado possui 2 (dois) canais paralelos para aquisição de sinais, que possibilita a captura simultânea de duas pontes de extensômetros diferentes.

Também foi utilizado um computador AMD Athlon® 1 GHz, HD Sygate® de 80 Gb, RAM 512 Mb, ou seja, possui memória e capacidade de processamento suficiente para o armazenamento e processamento dos dados coletados. Os dados foram importados do osciloscópio através da porta serial RS232.

O software utilizado para capturar os sinais do canal 1 do osciloscópio digital (martelo instrumentado) e do canal 2 (corpo de prova instrumentado) foi o Wavestar (versão 1.1). O osciloscópio digital e o condicionador de sinais (o qual possui dois canais) pertencem ao Laboratório de Ensaios Mecânicos – DEM – UNESP/campus de Ilha Solteira.

A figura 43 evidencia a utilização de um compensador estático empregado na cadeia de medição apresentada na figura 44.

Figura 42 - Curva ganho x frequência do condicionador para um ganho de 100x.



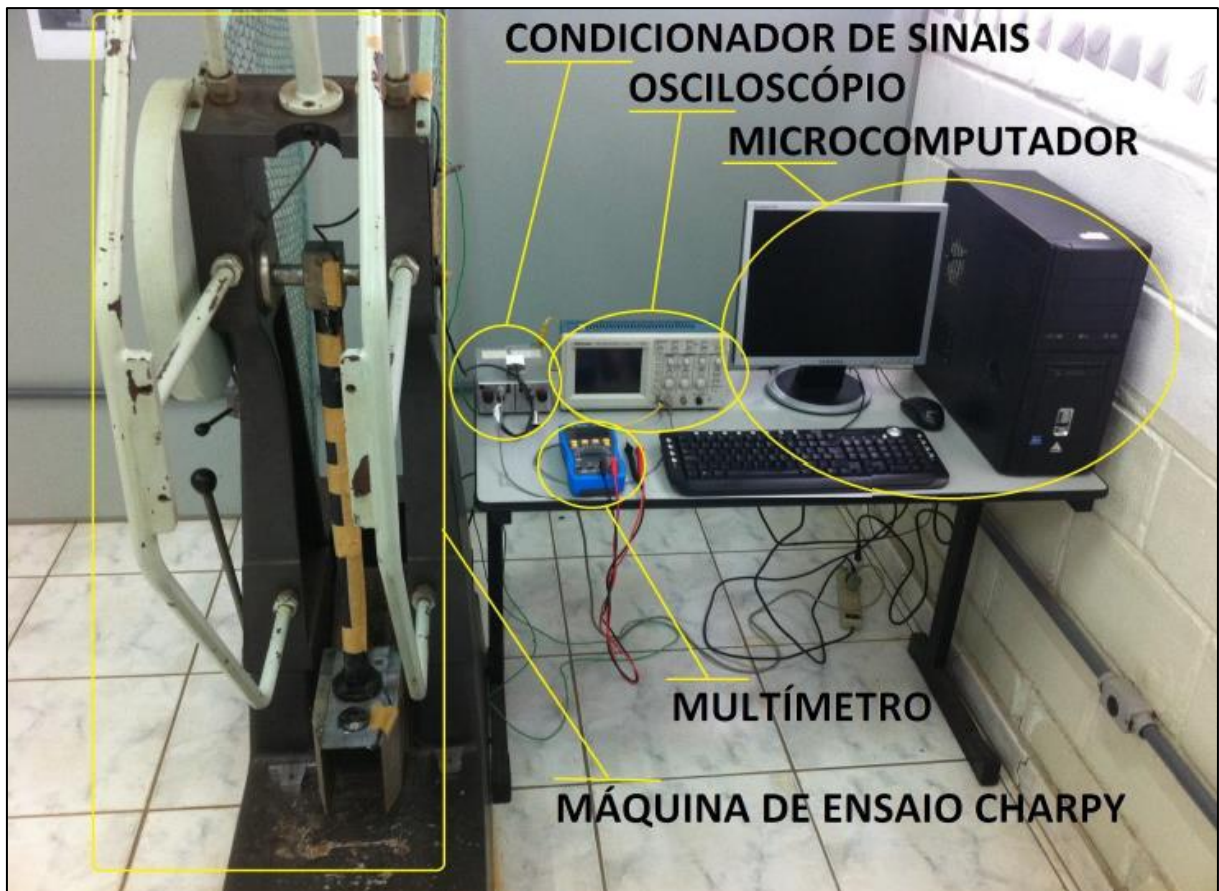
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 43 - Compensador estático.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 44 - Cadeia de medição e máquina de ensaio instrumentada.



Fonte: Elaboração do autor.

8.5 Calibração estática

A calibração do martelo pendular foi realizada seguindo o método desenvolvido por Vidotto (2003) e Rodrigues (2001), que envolveu os passos detalhados abaixo.

Primeiramente, levou-se o martelo instrumentado até o corpo de prova devidamente posicionado na máquina de ensaio Charpy. Em seguida, a célula de carga foi acoplada ao martelo e o macaco hidráulico foi posicionado em um apoio preso à base da máquina de ensaio de modo a exercer um carregamento sobre todo o conjunto, vide figura 45.

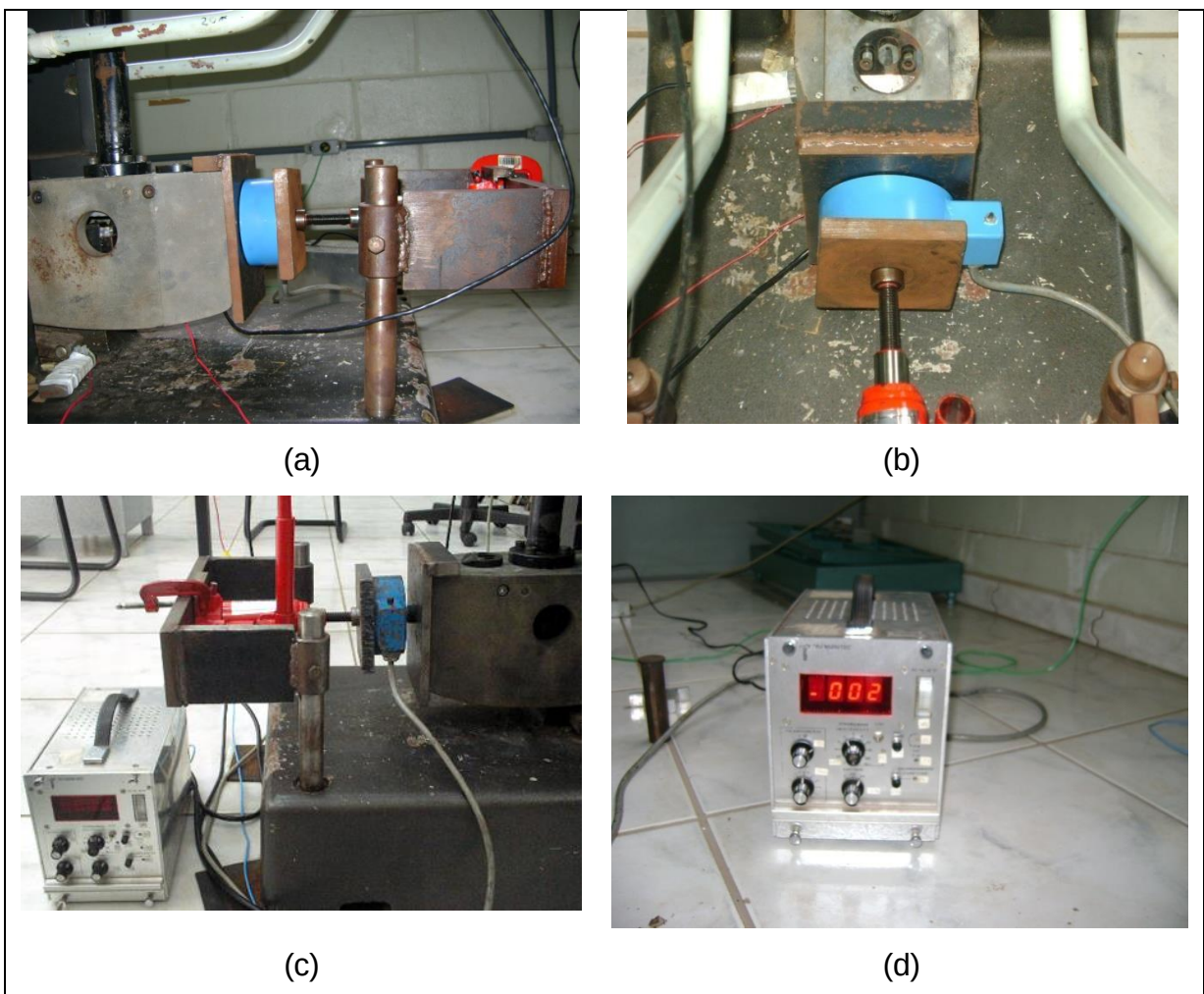
O TMDE⁹ foi zerado, pois no primeiro momento, no qual ainda não foi aplicada nenhuma carga o equipamento deve apresentar 0 (zero) em seu display.

⁹ TMDE é um equipamento utilizado para medir a deformação.

A excitação no condicionador foi ajustada para 5 V e o ganho foi ajustado para 100x, então o martelo foi conectado na entrada do condicionador.

Toda vez que era aplicada carga com o macaco hidráulico no sistema lia-se ao valor da deformação apresentado pelo TMDE e a diferença de potencial na saída do condicionador de sinais apresentada no display do multímetro. Os valores registrados pelos equipamentos foram registrados enquanto era aplicada carga com o macaco hidráulico e também durante o descarregamento.

Figura 45 - (a), (b) e (c) Montagem experimental para levantar a curva de calibração estática e (d) TMDE.



Fonte: Rodrigues (2001).

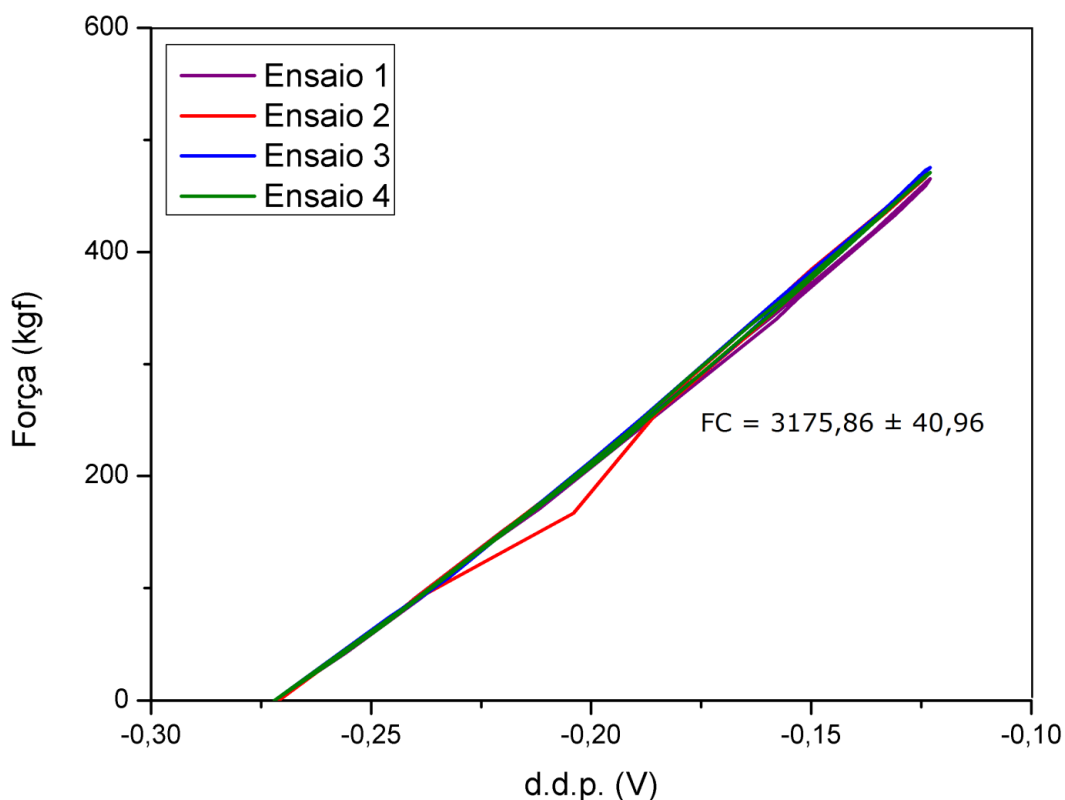
A partir dos dados coletados foram construídas as curvas de calibração, vide figuras 46 a 49, a partir das quais é possível obter o fator de calibração (FC) para cada um dos cutelos, já que este é dado pelo coeficiente angular da curva obtida.

Neste caso, o procedimento foi repetido quatro vezes e, então, calculou-se o fator de calibração dado pela média dos valores obtidos.

O procedimento é exatamente o mesmo para obter o fator de calibração do corpo de prova (quando instrumentado).

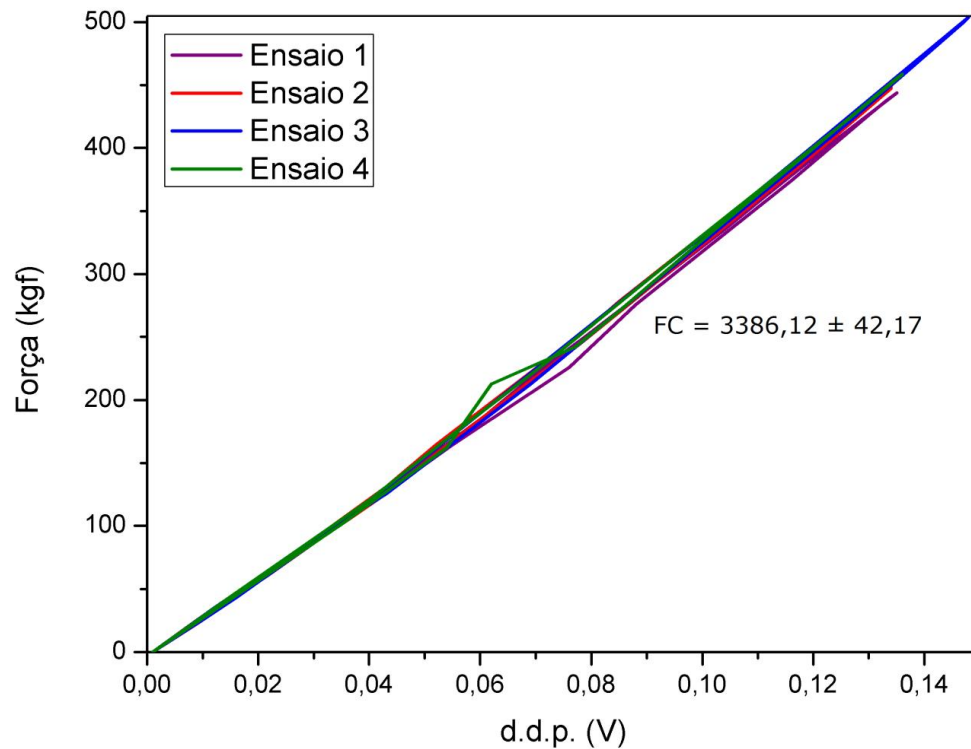
É necessário calibrar a máquina instrumentada novamente caso ocorra alguma mudança na forma de fixação do cutelo.

Figura 46 - Curvas de calibração do cutelo de menor rigidez.



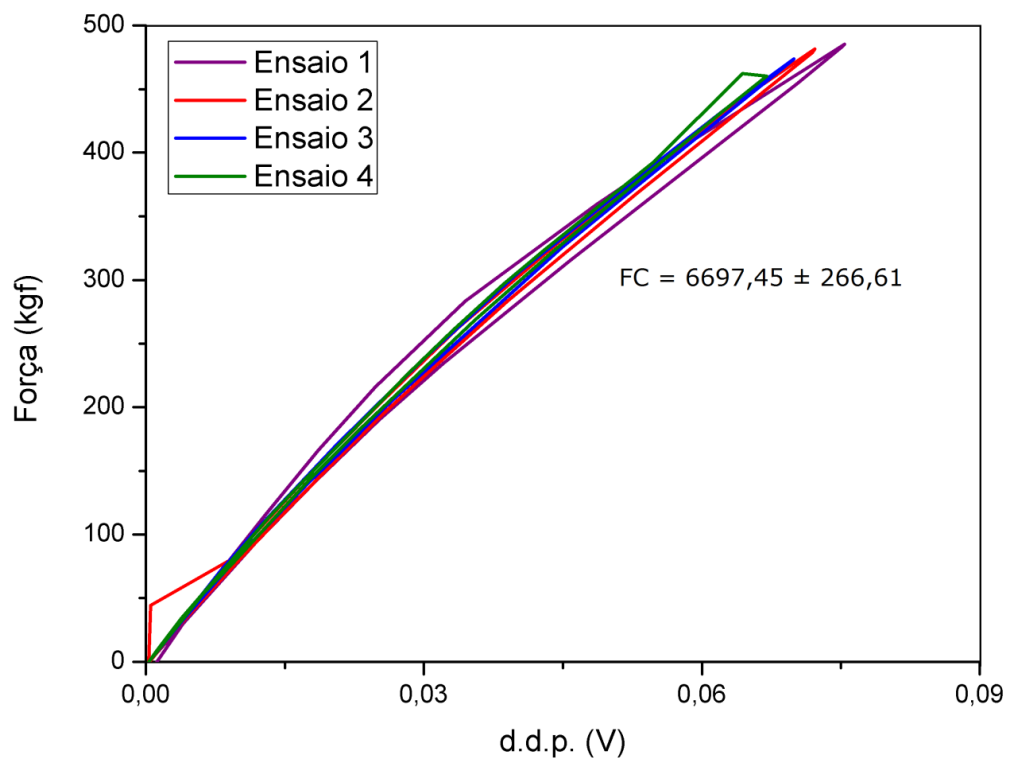
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 47 - Curvas de calibração do cutelo de rigidez intermediária.



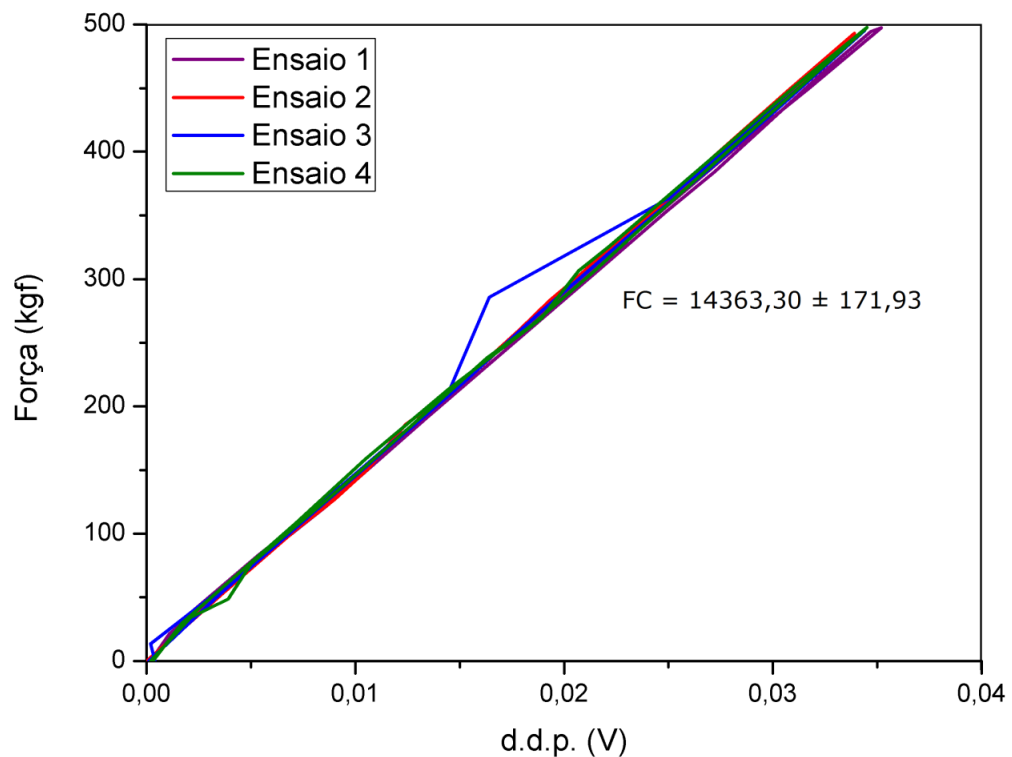
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 48 - Curvas de calibração do cutelo de maior rigidez, extensômetros posicionados a 9,8 mm da extremidade do cutelo.



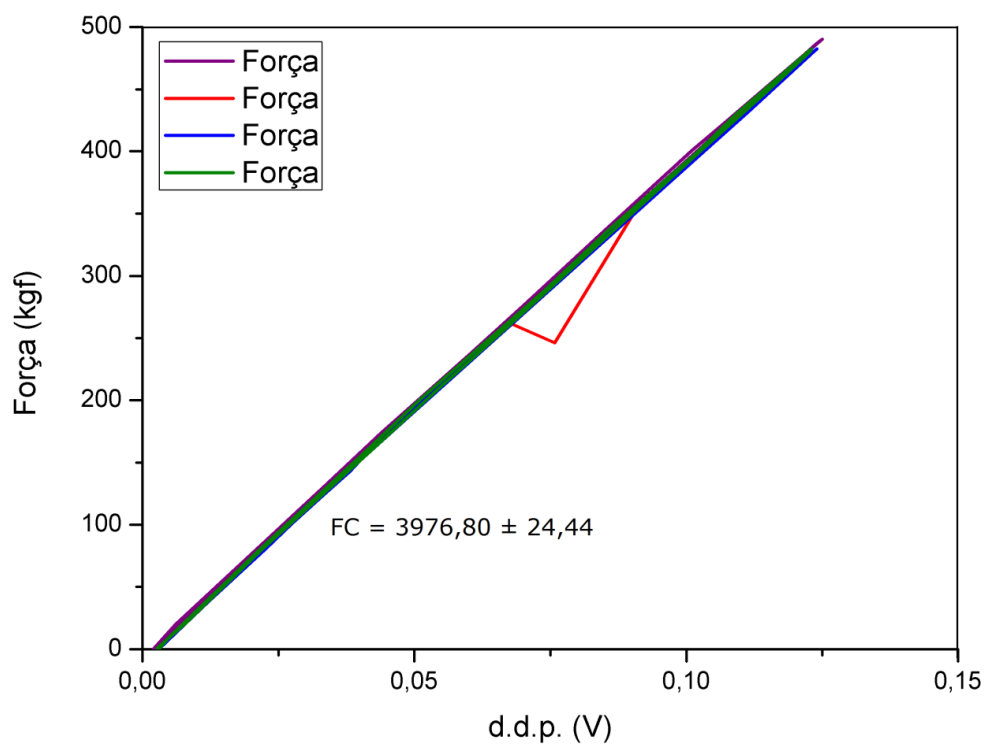
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 49 - Curvas de calibração do cutelo de maior rigidez, extensômetros posicionados a 23,1 mm da extremidade do cutelo.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 50 - Curvas de calibração do cutelo de diferente geometria.



Fonte: Elaboração do autor.

9 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão apresentados os resultados e respectivas discussões dos ensaios realizados que empregam os materiais e metodologia descrita no item 8 deste trabalho. A rotina computacional utilizada no tratamento dos sinais encontra-se detalhada no Apêndice B.

9.1 Curvas força vs tempo

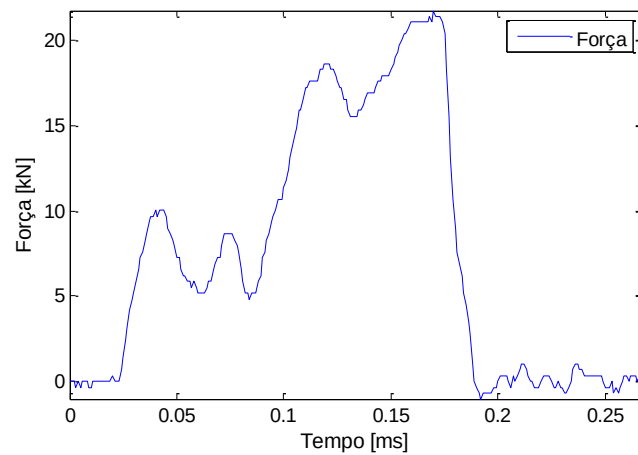
As figuras 51 a 56 apresentam curvas *força vs tempo* obtidas experimentalmente, isentas de qualquer tipo de tratamento digital, em seguida são apresentadas nas figuras 58 a 61 as curvas dos respectivos ensaios após o tratamento com o filtro média móvel (equação 25), com $M = 55$ pontos e valor da energia absorvida durante o impacto, dado pela equação 6.

É possível observar a presença de ruído de fundo nas figuras 51 a 56. Além disso, as curvas citadas também apresentaram oscilações.

As curvas 53 e 56 foram geradas para que as oscilações pudessem ser comparadas com as observadas nos materiais mais frágeis. Observa-se que a magnitude das flutuações se assemelham nas figuras 51, 52 e 56, vide variações nas curvas na faixa entre 5 kN e 10 kN, no aço 1020 nota-se uma perturbação nessa faixa, mas a oscilação não é tão expressiva como nos outros materiais utilizados neste estudo, aços SAE 1040, ABNT 4340 e API X70.

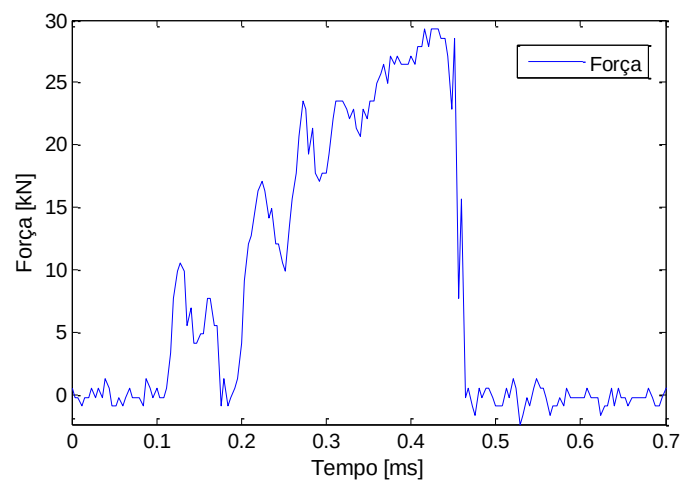
Nota-se também que o período das oscilações difere nos sinais apresentados, sendo mais relevante nos sinais de menor duração, no caso para os aços 4340 e 1040 (figuras 51 e 52) e menos significativos nos sinais de maior duração, 1020 e API X70 (figuras 53 e 55).

Figura 51 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço 1040.



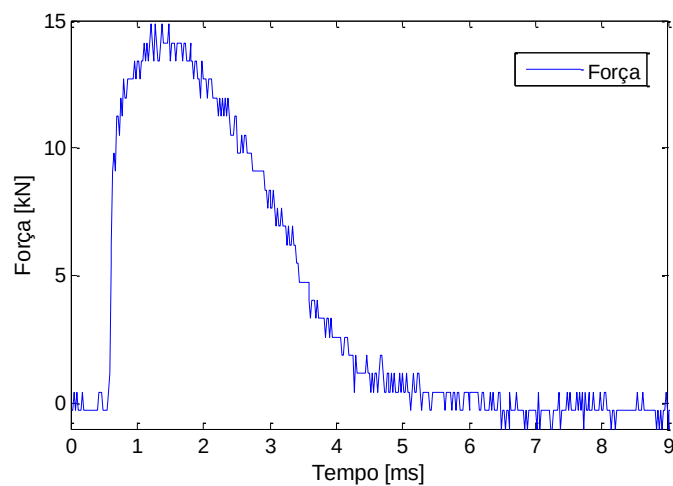
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 52 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço 4340.



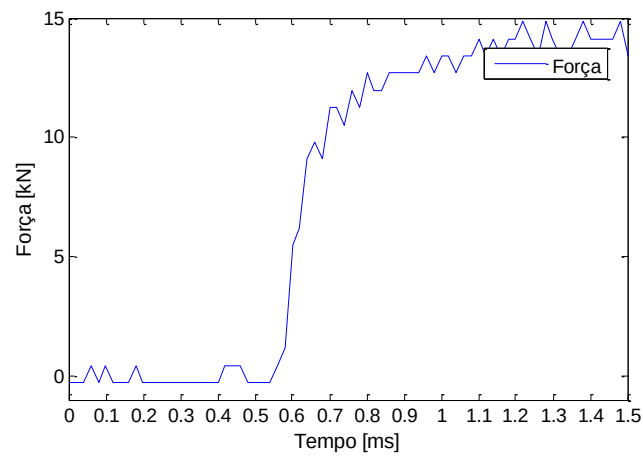
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 53 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço 1020.



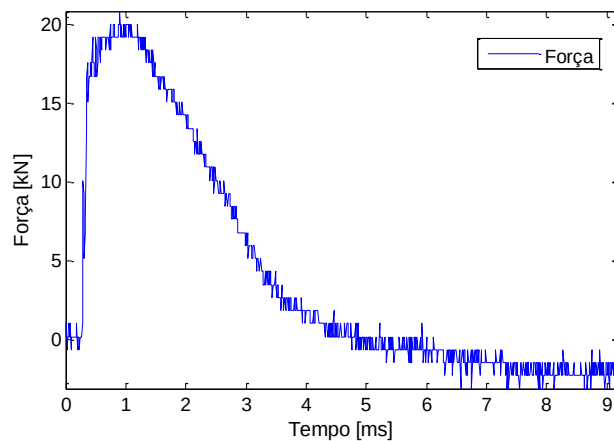
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 54 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço 1020, zoom no intervalo entre 0 e 1.8 ms.



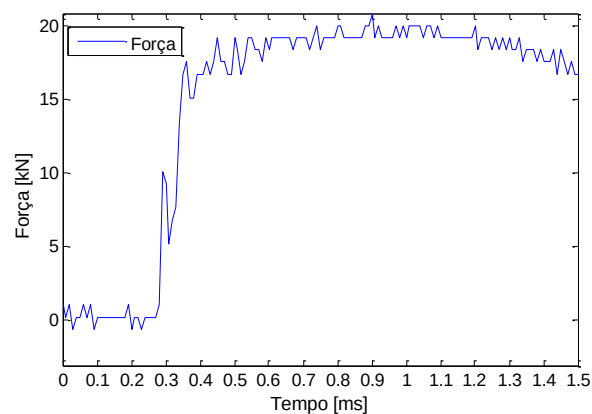
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 55 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço API X70.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 56 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço API X70, o intervalo entre 0 e 1.5 ms.

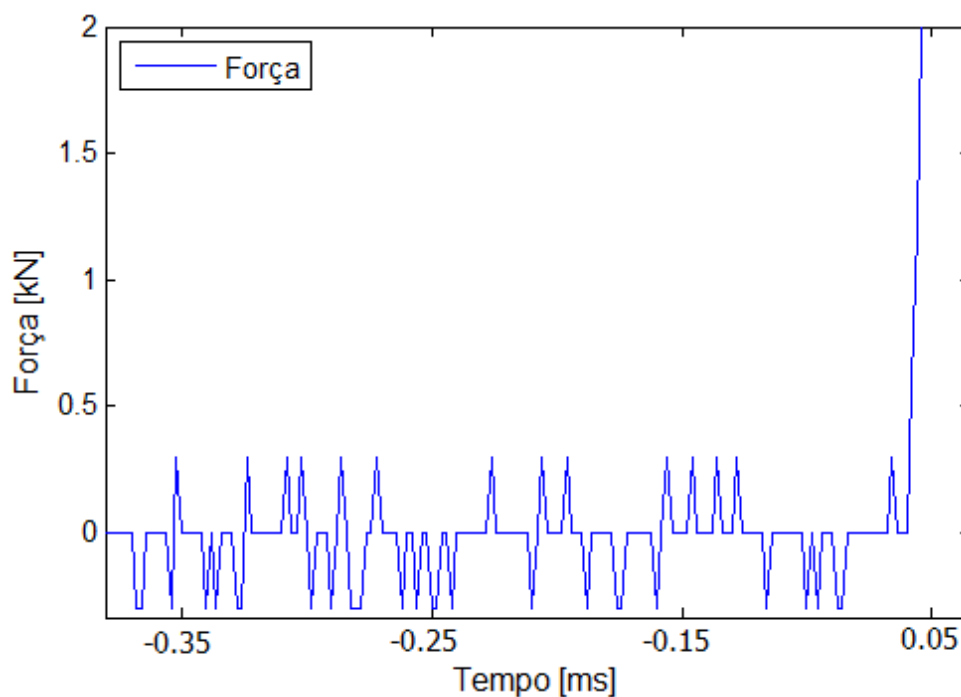


Fonte: Elaboração do autor.

Percebe-se, através das figuras 51 a 56, que as oscilações presentes nas curvas força vs tempo omitem informações importantes, como o limite de escoamento dinâmico, força máxima, entre outros. Isto ocorre porque ao observar as curvas, da forma como foram apresentadas, não é possível determinar a influência das interferências sobre o valor da força em um determinado instante, faz-se necessário um tratamento do sinal de modo a eliminar tais interferências.

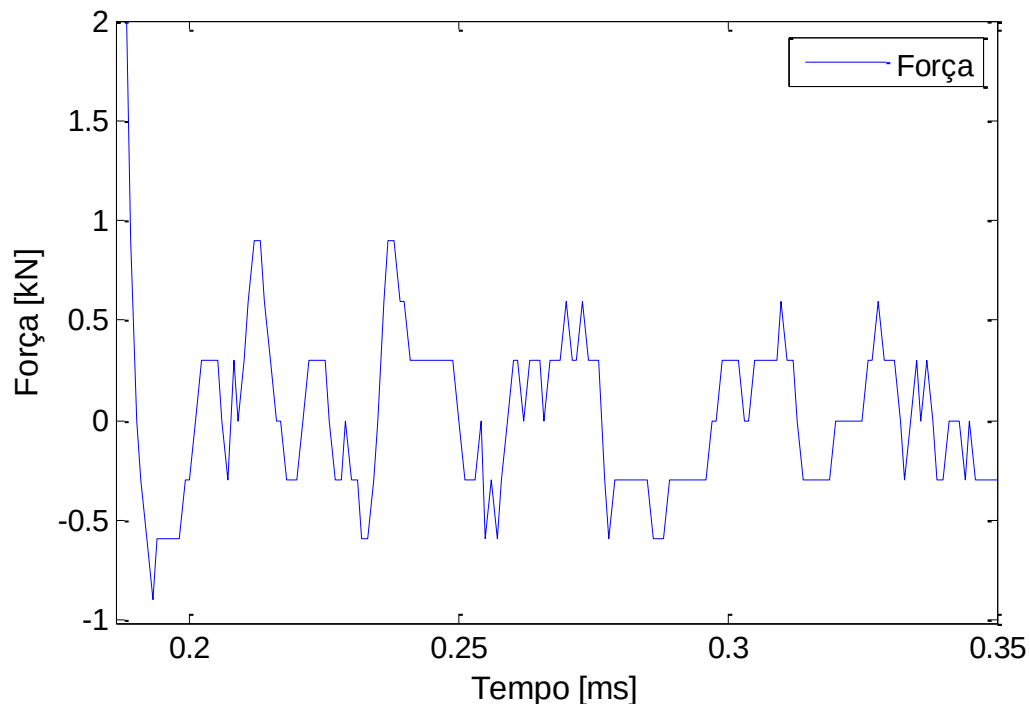
Observando a curva do aço 1040, figura 51, é possível comparar o estado de vibrações antes e após o impacto, já que a magnitude das oscilações no sinal após 0.2 ms são superiores, aproximadamente o dobro, àsquelas observadas em instantes anteriores ao impacto, como a fratura do corpo de prova já ocorreu nota-se que este é um efeito inerciais da máquina de ensaios, vide figuras 57 e 58.

Figura 57 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço 1040, instantes antes de ocorrer o impacto.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 58 - Curva *força vs tempo*, material ensaiado: aço 1040, instantes após a fratura do corpo de prova.



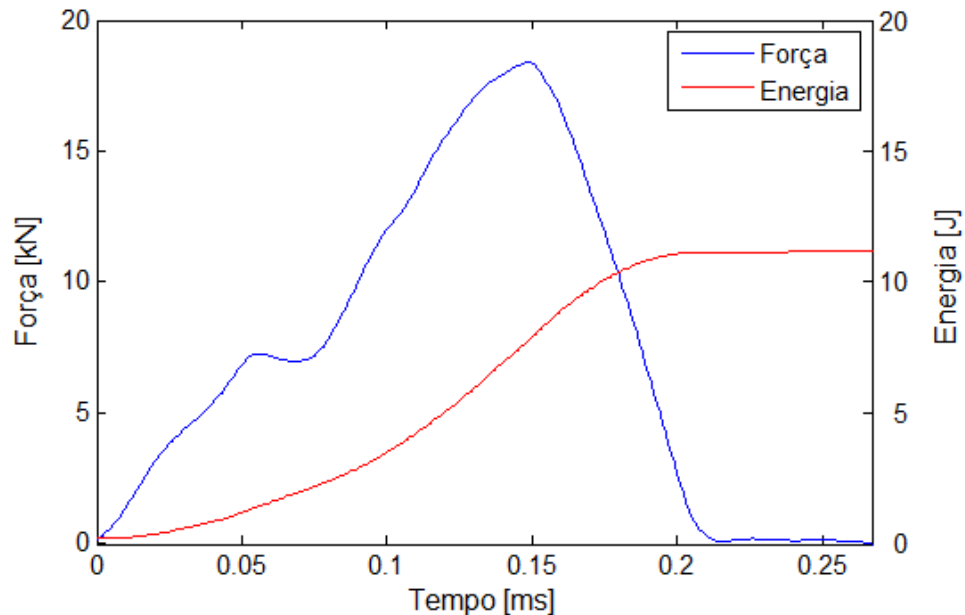
Fonte: Elaboração do autor.

Cada material apresentou flutuações no sinal de forma característica, o que sugere que os efeitos inerciais possuem relação com o material ensaiado. Por exemplo, embora os aços 1040 e 4340 apresentem menor ductilidade, as oscilações no aço 4340 fizeram o valor da força tender a 0 (zero) entre 0.1 e 0.2 ms, voltando a aumentar após 0.2 ms. Algo que não ocorreu no comportamento da força para o aço 1040 no intervalo de tempo em questão, apesar deste também apresentar oscilações bem pronunciadas.

Por sua vez, os aços de maior ductilidade, 1020 e API X70, por apresentarem curvas de maior duração mostram uma redução considerável na intensidade das oscilações, revelando que o comportamento da força apresentado nos gráficos das figuras 54 e 56 é menos influenciado pelos efeitos inerciais, já que os materiais dúcteis empregados são capazes de reduzir a magnitude da vibração, pois devem utilizar grande parte da energia no escoamento e destinando menos para a produção desse efeito. A duração da curva força vs tempo para materiais dúcteis também é apresenta maior duração, ao final do impacto as oscilações já se encontram bastante amortecidas.

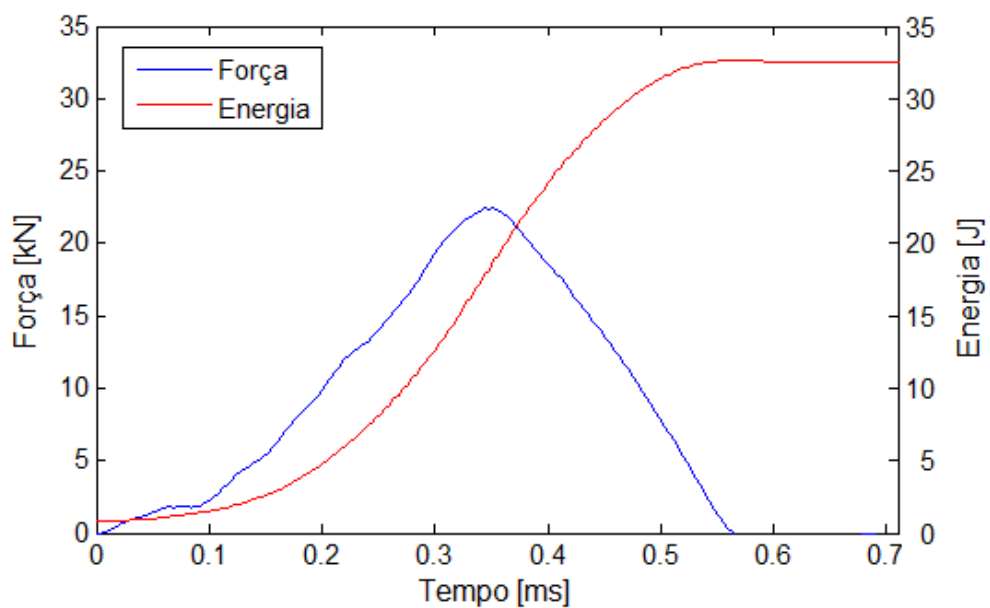
As figuras 59 a 62 apresentam as curvas das figuras 51, 52, 53 e 55 após o tratamento com o filtro média móvel. Valor da energia calculado através do método 1/3 de Simpson.

Figura 59 - Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço 1040.



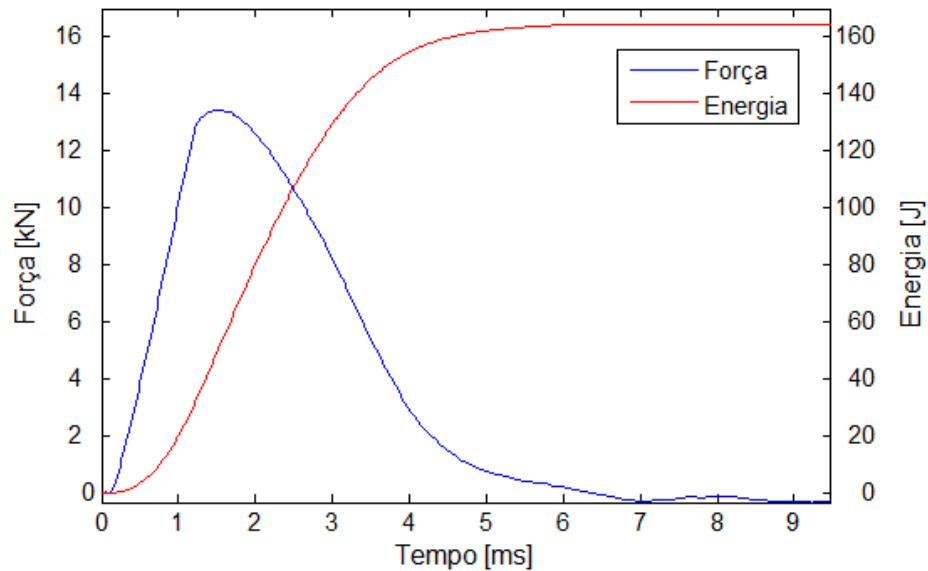
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 60 - Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço 4340.



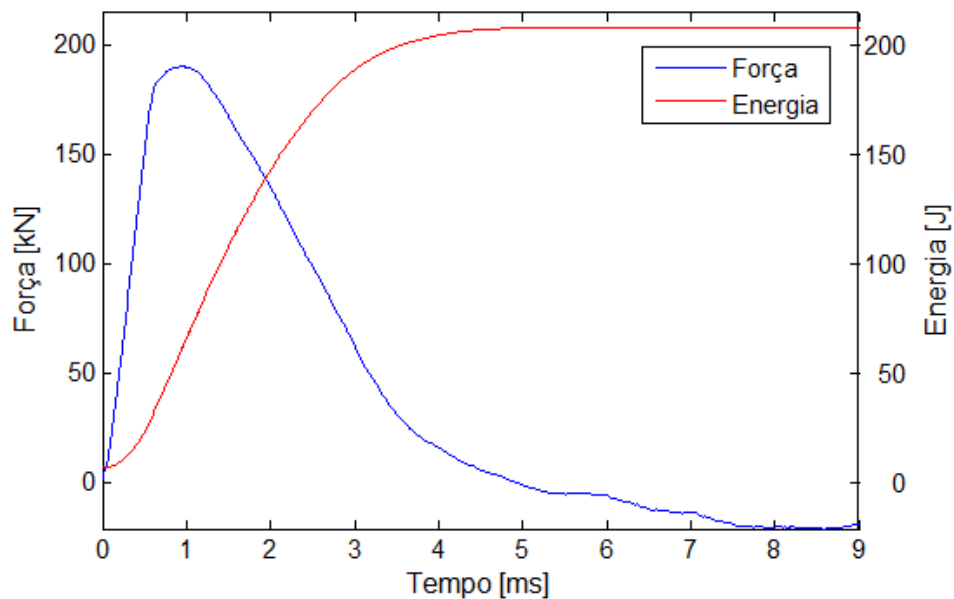
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 61 - Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço 1020.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 62 - Curva força e energia vs deslocamento, amostra: aço API X70.



Fonte: Elaboração do autor.

A tabela 5 contém um resumo das informações obtidas através do ensaio de impacto. Enquanto o ensaio clássico forneceria apenas a energia global de fratura através do dial da máquina de ensaio (KV), o ensaio instrumentado, além de fornecer este valor através da integração numérica da curva *força vs deslocamento* (W_t), também foi capaz de fornecer o valor da força máxima, tempo de fratura, além

de monitorar todo o processo de deformação e fratura, como mostrado nas curvas das figuras 59 a 62.

Tabela 5 - Comparativo entre dureza do material, energia global de fratura, força máxima, deslocamento e tempo de fratura.

Material	Energia Global de Fratura			Força Máxima	Deslocamento	Tempo de fratura
	Dial (KV)	Integração numérica (Wt)	Desvio			
	[J]	[J]	(%)			
SAE 1040	12	11,26	6,18	18,37	1,2	0,17
ABNT 4340	35	33,11	5,39	21,76	3,1	0,36
SAE 1020	167	162,15	2,90	13,42	27,5	7,15
Aço API X70	217	208,02	4,14	19,04	29,5	5,64

Fonte: Elaboração do autor.

Através da tabela 5 é possível notar que o deslocamento e o tempo de fratura tendem a aumentar assim que o valor da energia global de fratura do material aumenta, pois os materiais dúcteis são capazes de se deformar muito mais do que os frágeis, pois apresentam uma fase plástica significativamente maior (algo que é pouco expressivo ou inexistente nos frágeis). No entanto, para que a deformação ocorra é necessária certa quantidade de energia.

A trinca (formação de planos) não se propaga enquanto a porção de material a sua frente não tiver absorvido a máxima quantidade de energia possível para se deformar, o que retarda sua propagação. Logo, o tempo de fratura está associado à energia global de fratura.

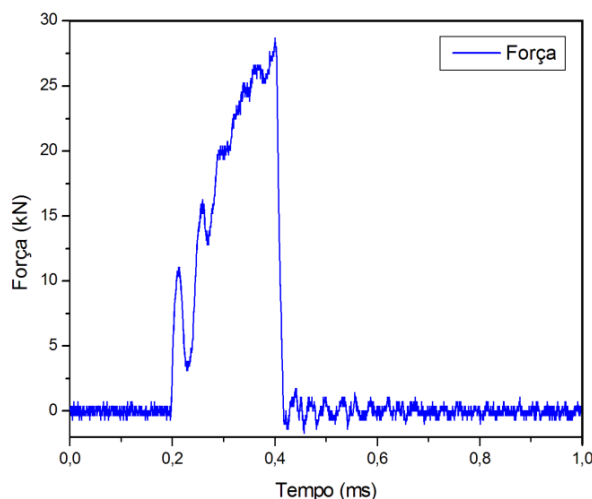
9.2 Uso de filtros digitais

Considerando que os sinais obtidos estão sujeitos a interferências e que estas ocorrem devido a efeitos inerciais, então seria possível eliminar estes efeitos através

de tratamentos digitais. Caso as oscilações sejam periódicas, seria possível empregar filtros digitais¹⁰ para atenuá-las.

Buscou-se determinar a banda do sinal de interesse e na de eliminar as interferências nos sinais tomando como referência o sinal (vide figura 63) obtido a partir de um ensaio instrumentado empregando corpos de prova de aço 4340, material que o grupo de pesquisa está acostumado a analisar, ou seja, de comportamento já conhecido. Então, foram geradas as curvas apresentadas através das figuras 63 a 69, obtidas depois do tratamento com diferentes filtros: figuras 64 a 67 passa-baixa, figuras 68 a 71 passa-alta, figuras 72 a 75 passa-faixa e figuras 76 a 79 média móvel.

Figura 63 - Curva *força vs tempo* (original), material ensaiado: aço ABNT 4340.

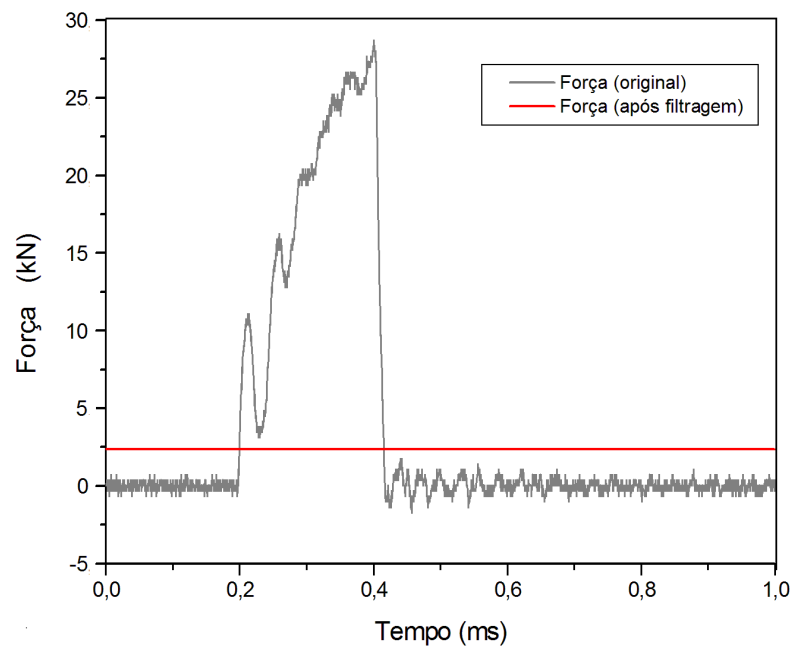


Fonte: Elaboração do autor.

Observando as figuras 64 a 67, sinal original é representado em cinza e em vermelho o resultado obtido após tratamento digital, nota-se que as componentes mais relevantes do sinal obtido através do ensaio instrumento encontram-se abaixo de 100 kHz, como mostra a figura 67. A figura 66 indica que existem componentes relevantes entre 10 kHz e 100 kHz, já que o comportamento da curva sinal após a aplicação do filtro passa-baixa com frequência de corte (f_c) igual a 10 kHz se encontra consideravelmente distorcido, evidenciando que as componentes acima de 10 kHz também fazem parte do sinal de interesse.

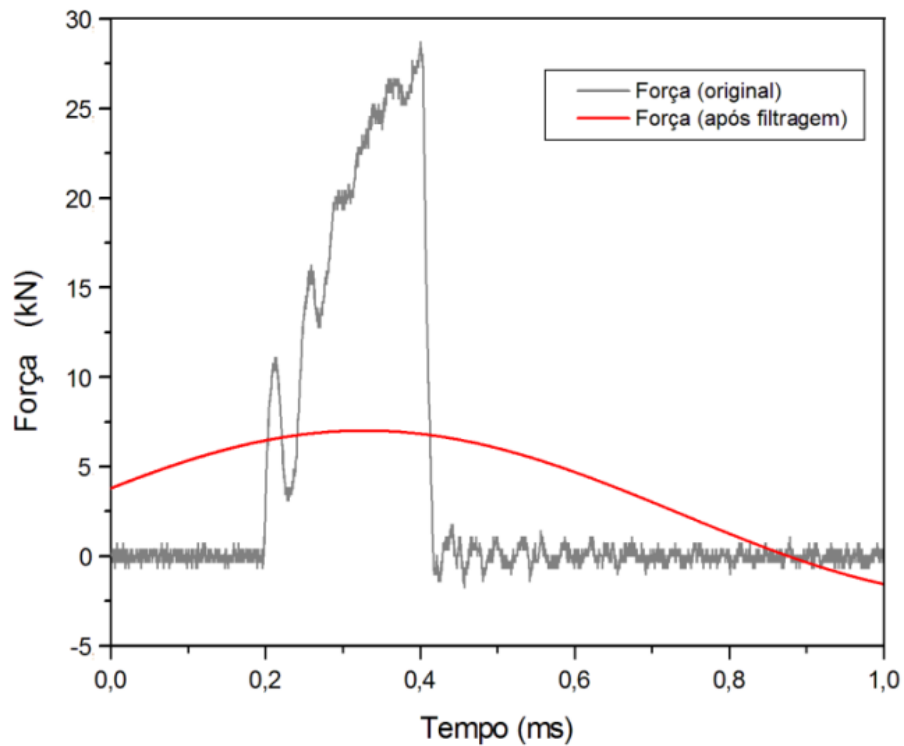
¹⁰ Este conceito aplica-se apenas às oscilações causadas por efeitos inerciais, não se aplica ao ruído de fundo, pois não há sentido em “filtrar ruído”, embora seja comum encontrar esta expressão em buscas na Internet.

Figura 64 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 100$ Hz.



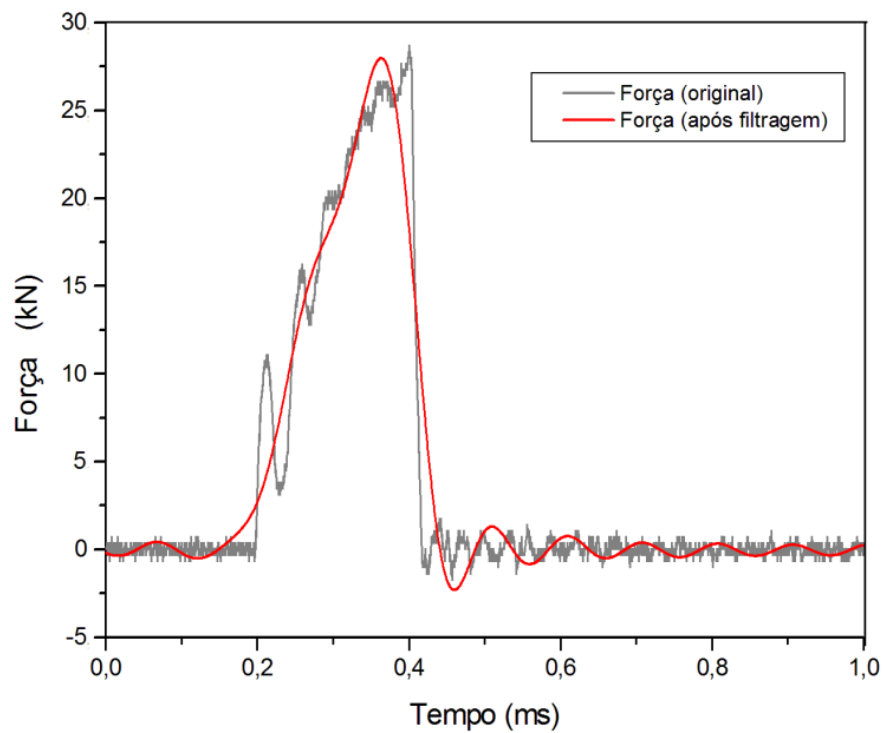
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 65 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 1$ kHz.



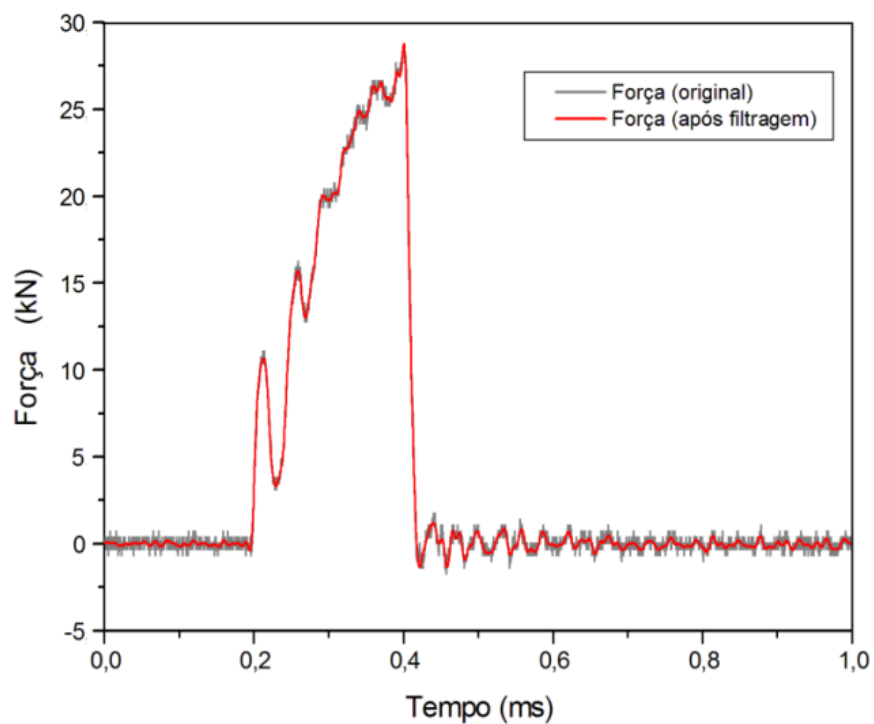
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 66 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 10$ kHz.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 67 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-baixa, $f_c = 100$ kHz.



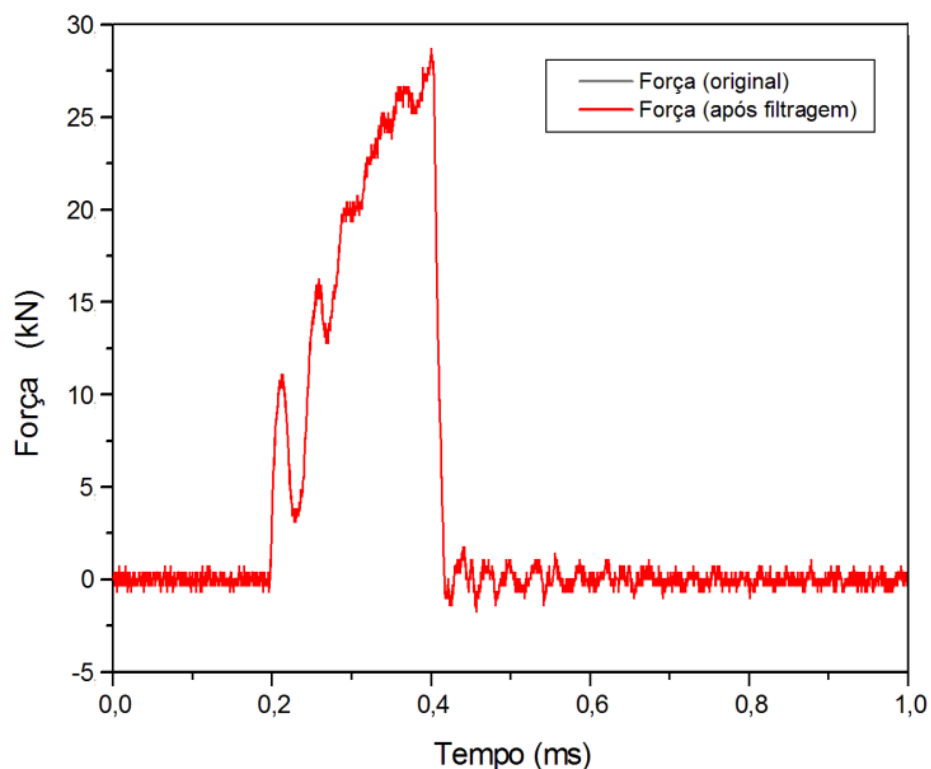
Fonte: Elaboração do autor.

A figura 68 não sofreu variações consideráveis após a filtragem com o passa-alta com $f_c = 100$ Hz, isto indica que o sinal em questão não possui componentes relevantes abaixo de 100 Hz.

A figura 69 mostra que algumas componentes foram retiradas, ou seja, o sinal de interesse apresenta componentes fundamentais em uma faixa entre 100 e 1 kHz. A figura 70 apresenta algumas componentes fundamentais do sinal, mas também evidencia consideravelmente as componentes responsáveis pelas flutuações na curva *força vs tempo*, é possível observar que os picos e vales das flutuações sobrepostas ao sinal de interesse correspondem ao do sinal filtrado, logo estas interferências estão situadas em uma faixa entre 10 kHz e 100 kHz.

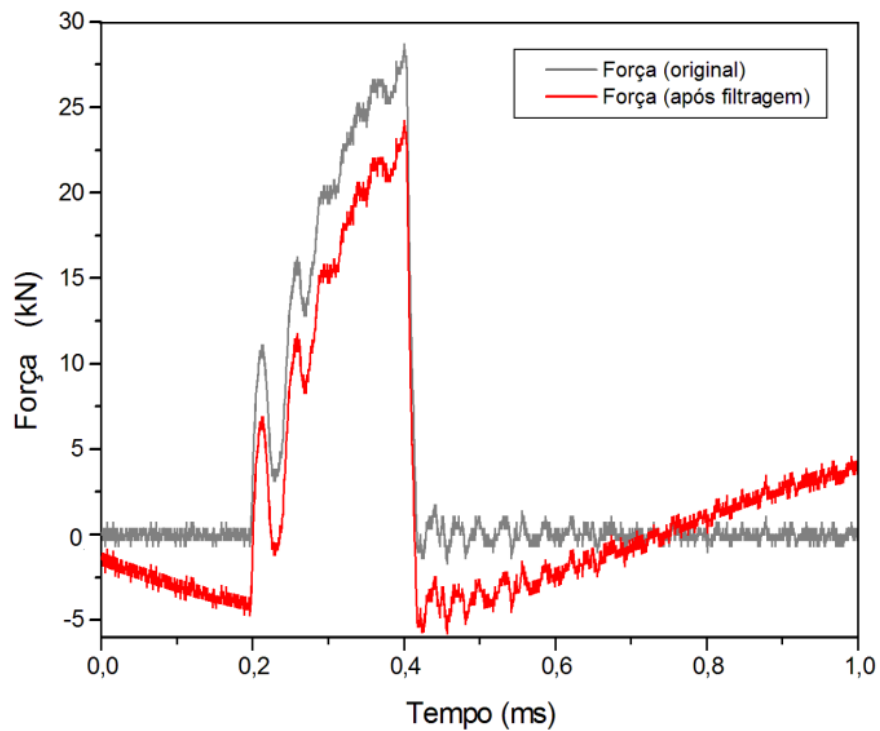
A figura 71 mostra que acima de 100 kHz não há a presença de componentes do sinal de interesse.

Figura 68 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 100$ Hz.



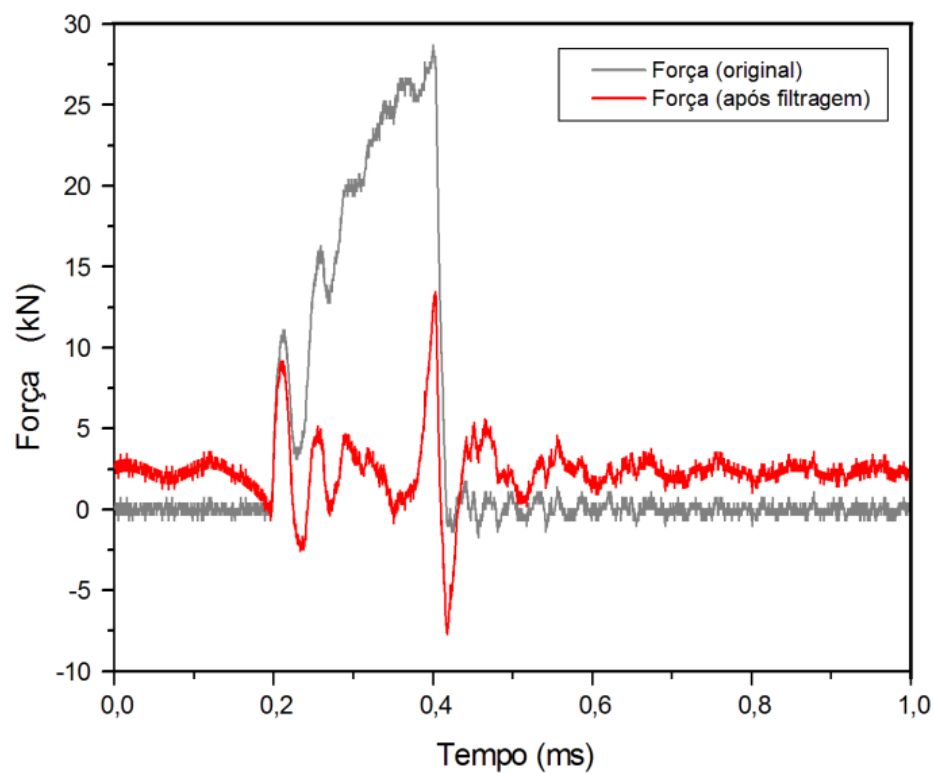
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 69 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 1$ kHz.



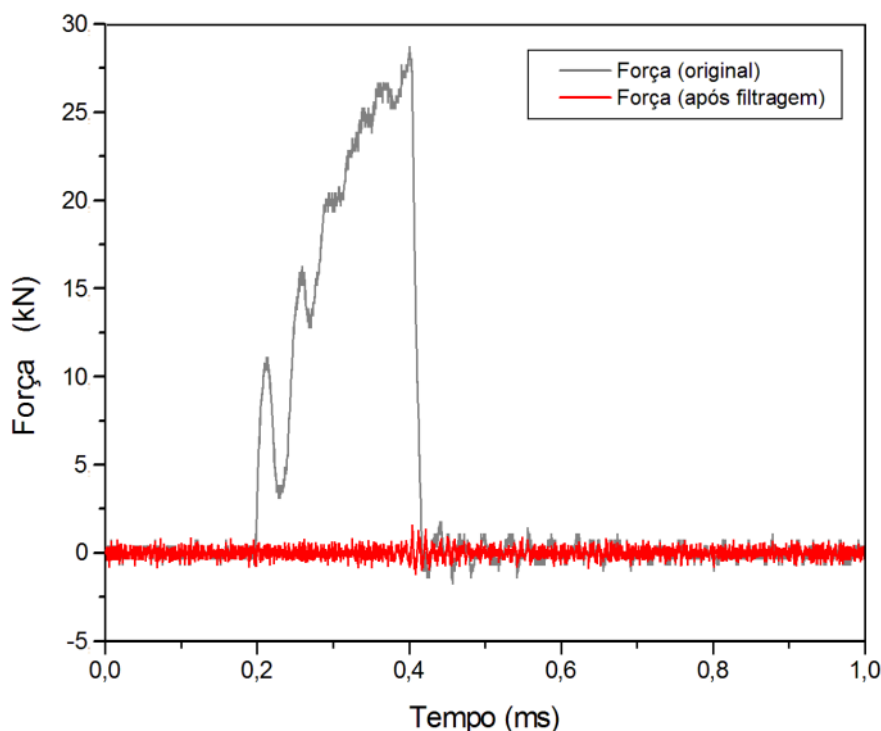
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 70 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 10$ kHz.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 71 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-alta, $f_c = 100$ kHz.



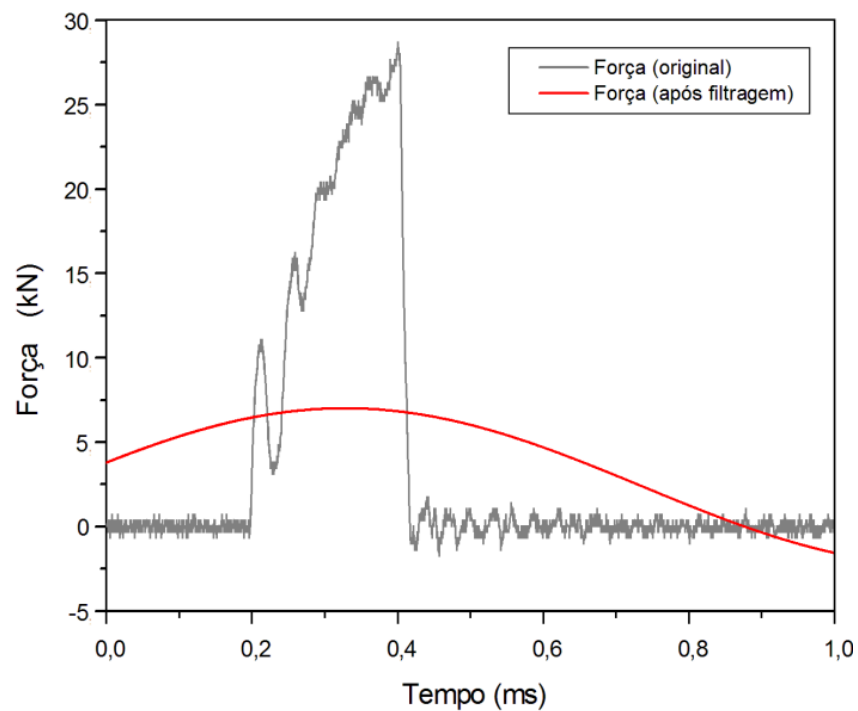
Fonte: Elaboração do autor.

A figura 72 indica que existem componentes na faixa entre 100 e 1 kHz, assim como os outros filtros haviam revelado.

Dentre as tentativas com o filtro passa-faixa a que mais se aproximou da curva *força vs tempo* esperada foi a da figura 73, que permite a passagem de componentes de frequência acima de 100 Hz e abaixo de 10 kHz, porém nota-se que ainda foram descartadas algumas componentes fundamentais entre 10 kHz e 100 kHz.

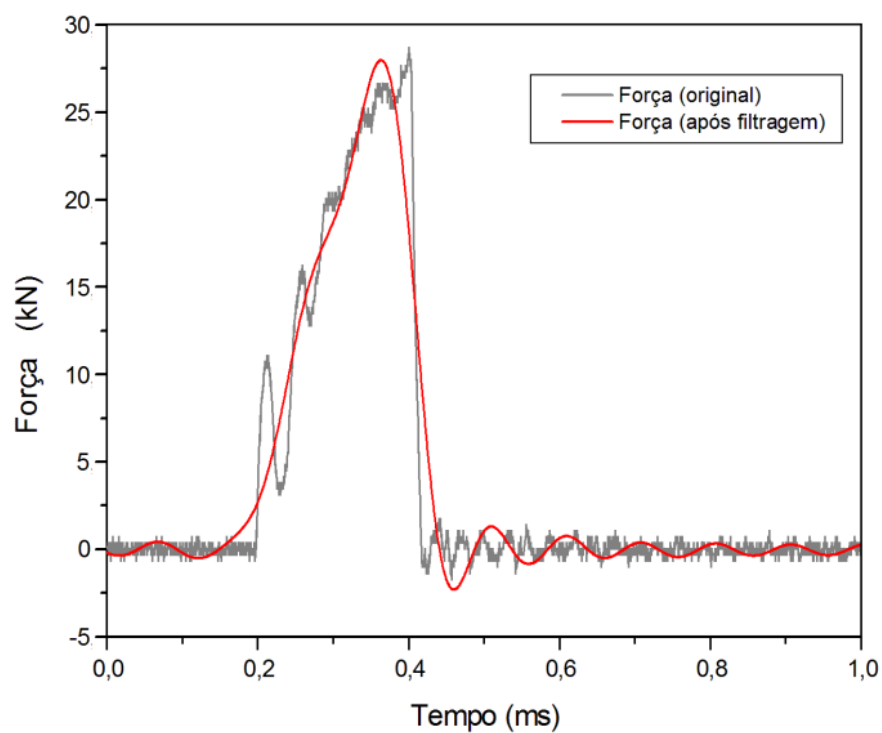
Tanto a figura 74, quanto a 75 mostram que parte do sinal está presente na faixa selecionada, mas o sinal resultante ainda está aquém de ser o sinal de interesse. No entanto, ao compará-las, nota-se que na faixa de 1 kHz a 100 kHz (figura 75) há uma presença de oscilações no sinal que não estavam presentes na faixa entre 1 kHz e 10 kHz (figura 74), evidenciando que as componentes mais consideráveis das oscilações encontram-se na faixa entre 10 kHz e 100 kHz.

Figura 72 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 100$ Hz e 1 kHz.



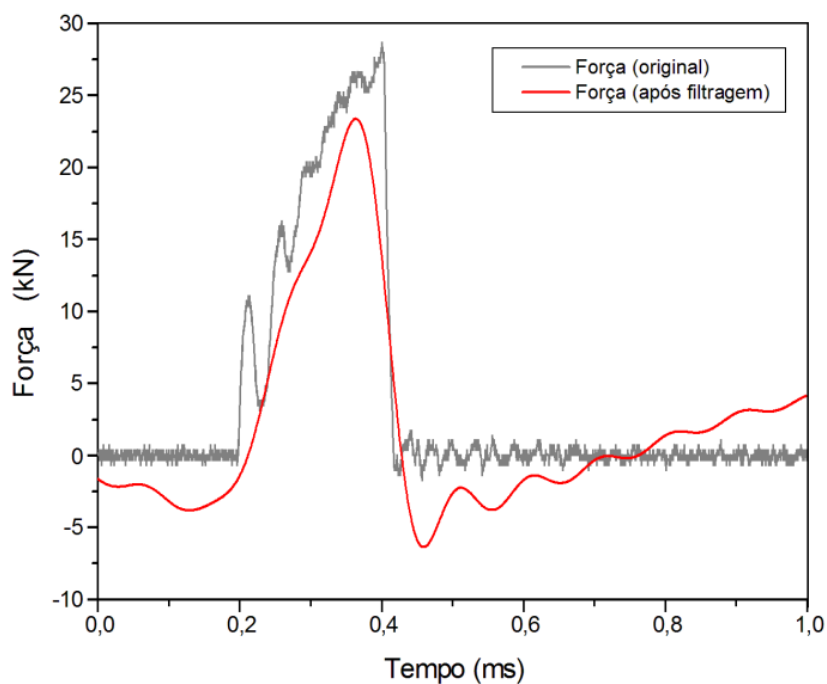
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 73 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 100$ Hz e 10 kHz.



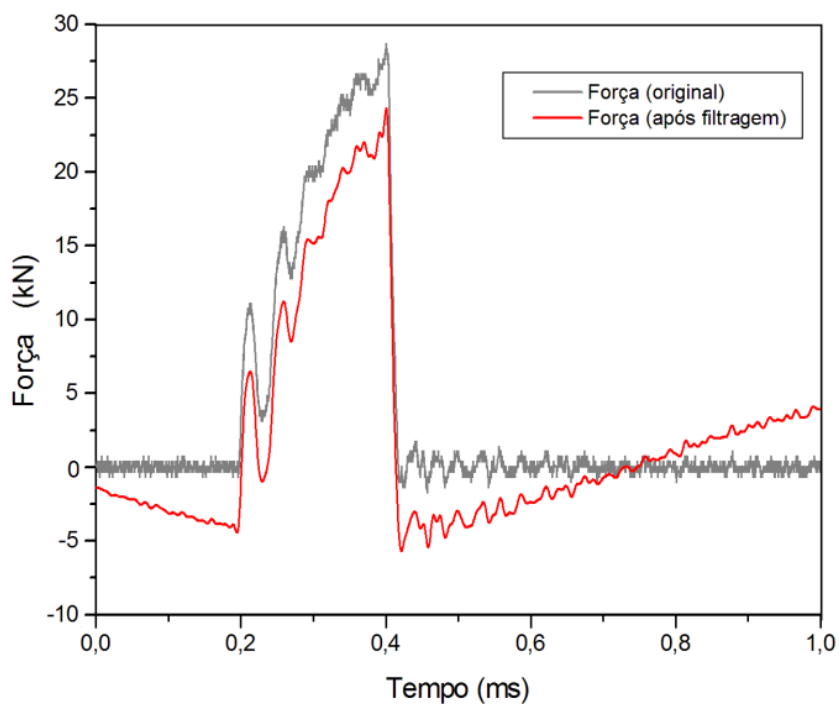
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 74 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 1$ kHz e 10 kHz.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 75 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro passa-faixa, $f_c = 1$ kHz e 100 kHz.



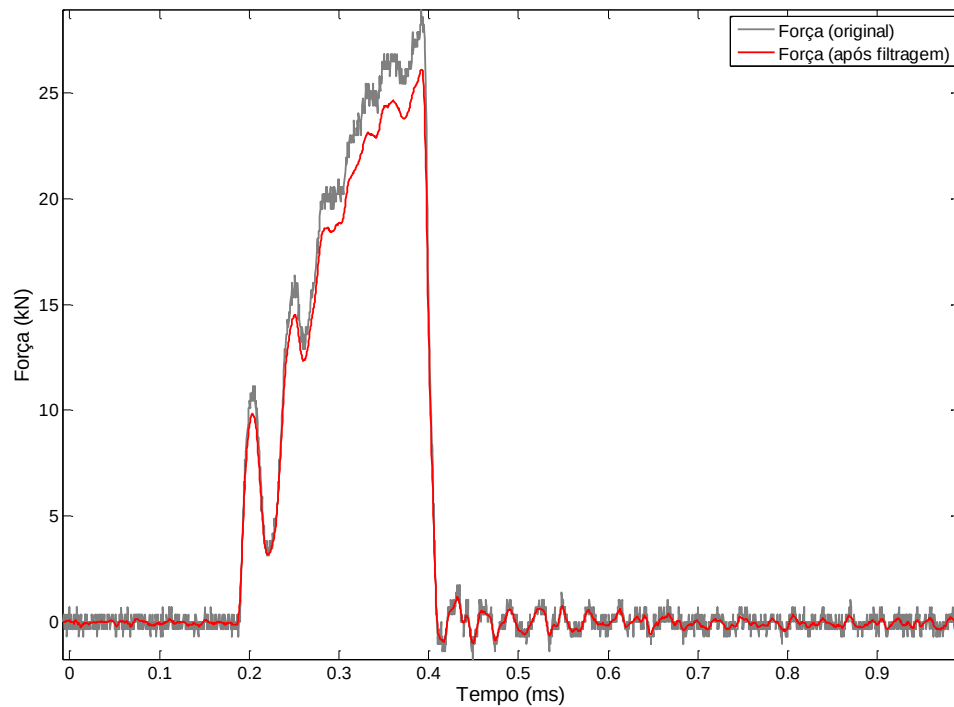
Fonte: Elaboração do autor.

As figuras 76 a 79 apresentam o resultado do tratamento da curva original utilizando o filtro média móvel, percebe-se que ao elevar o número de pontos as interferências (na faixa entre 10 kHz e 100 kHz) vão sendo eliminadas.

O tratamento com 55 pontos já foi capaz de suavizar a curva, o que pode permitir o funcionamento de métodos, como o da *compliance ratio*, que é sensível à flutuações abruptas no sinal, porém a distorção no comportamento da curva não é tão significativa, pois o sinal filtrado figura 76 ainda segue o comportamento da curva.

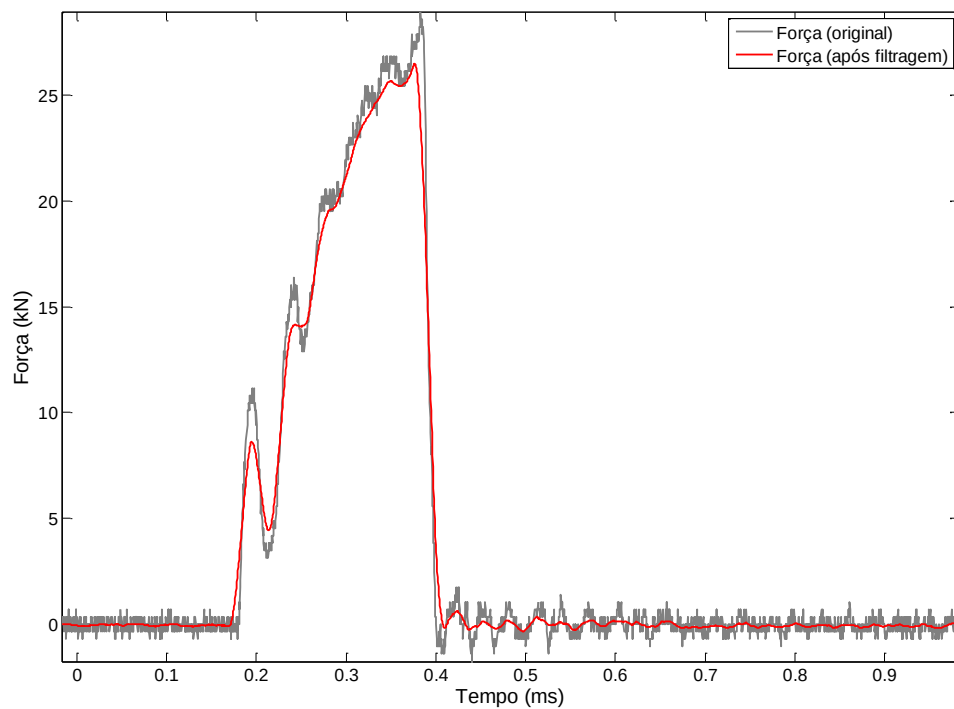
Porém se o número de pontos que compõem a média móvel (M) for demasiadamente elevado o filtro começa a distorcer significativamente o sinal, como se nota ao observar o ponto de máximo da curva, que passa a se deslocar consideravelmente do instante em que ocorreu na curva original, o que indica perda de informação e que deve ser evitado a todo custo, como se pode notar durante o aumento do número de pontos nas figuras 77 a 79.

Figura 76 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro média-móvel, $M = 15$ pontos.



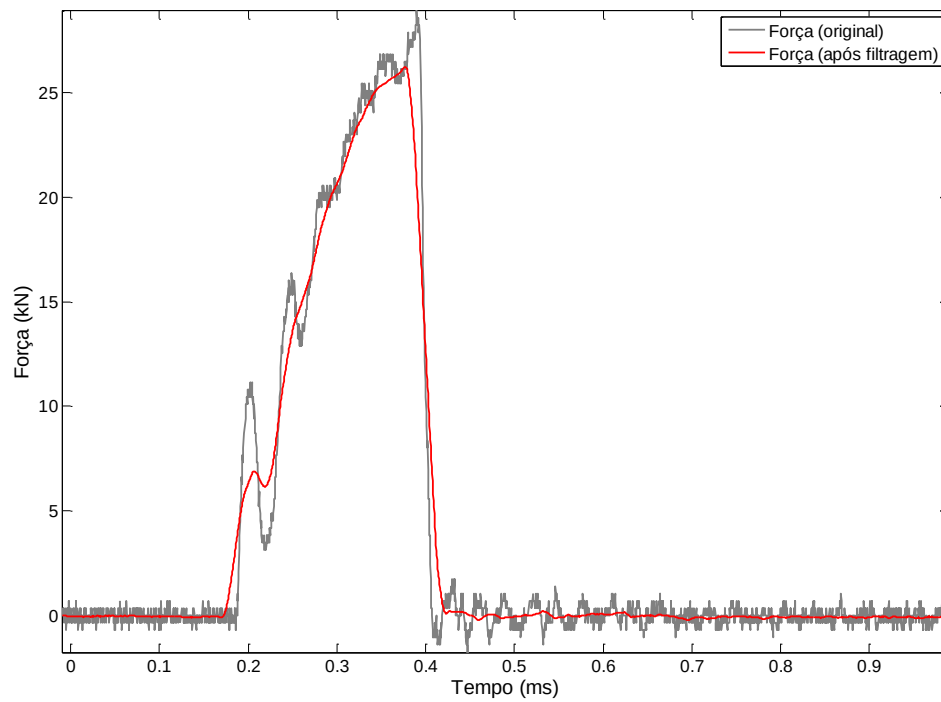
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 77 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro média-móvel, $M = 55$ pontos.



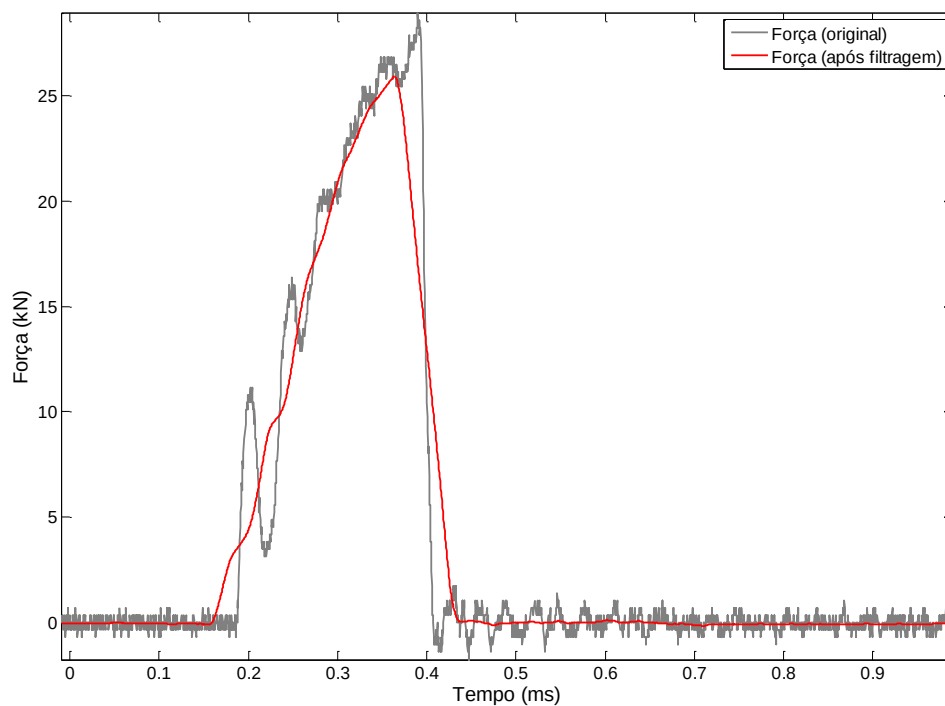
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 78 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro média-móvel, $M = 85$ pontos.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 79 - Curva *força vs tempo* após tratamento com filtro média-móvel, $M = 155$ pontos.

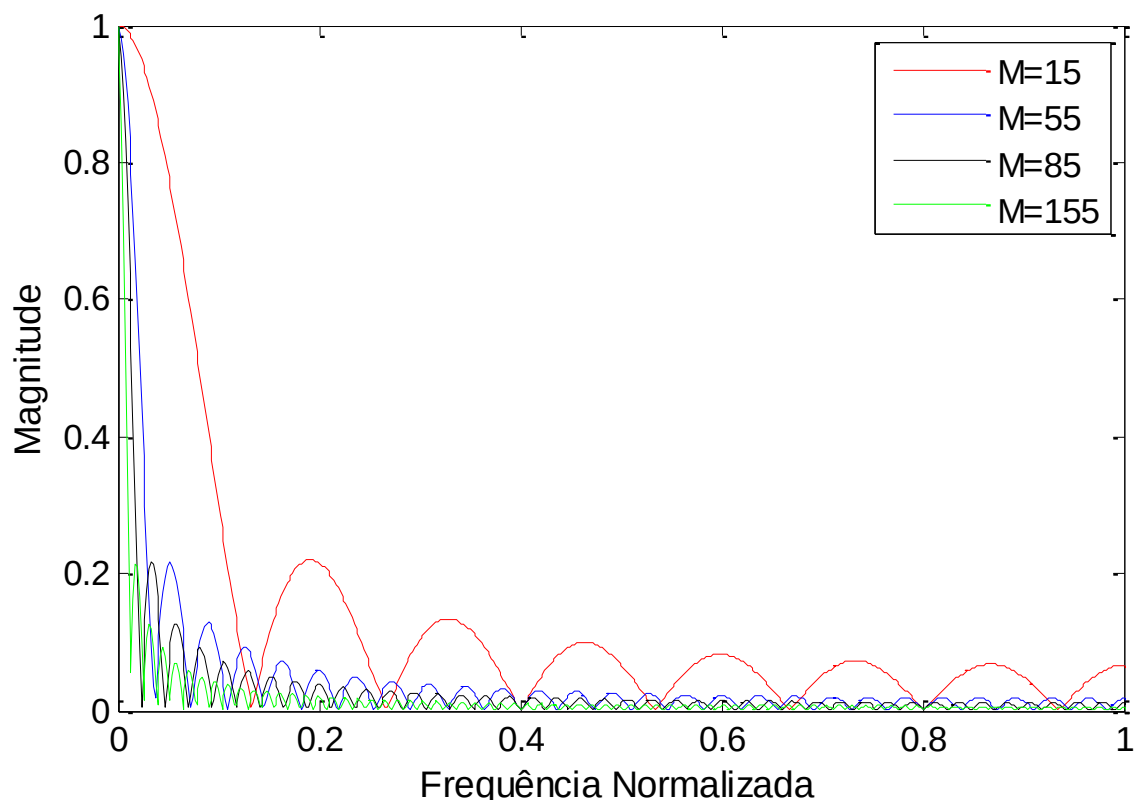


Fonte: Elaboração do autor.

Não foi empregado o filtro rejeita-faixa, pois não se desejava obter componentes que estivessem fora da faixa entre 10 Hz e 10 kHz, isto eliminaria o sinal de interesse neste estudo.

A figura 80 exibe a resposta em frequência (normalizada) do filtro média móvel em função do número de pontos adotados na filtragem das figuras 76 a 79.

Figura 80 - Resposta em frequência do filtro média móvel em função do número de pontos empregados.



Fonte: Elaboração do autor¹¹.

9.3 Influência do comprimento do corpo de prova

Conforme apresentado no item 7 deste estudo, diversos autores procuraram modelar o ensaio Charpy a fim de compreender as flutuações presentes nas curvas *força vs tempo* e *força deslocamento*.

Neste estudo procurou-se variar alguns dos parâmetros usados nas modelagens para averiguar a influência sobre o carregamento, um dos parâmetros presente nas equações é o comprimento do corpo de prova (L).

¹¹ Com base na equação 25

Para avaliar seu efeito, foram realizados ensaios com corpos de prova com entalhe-V com as dimensões definidas pela norma ASTM E-23 (1996), também com foram testados corpos de prova (aço 1040) com comprimento de 70 mm e de 85 mm.

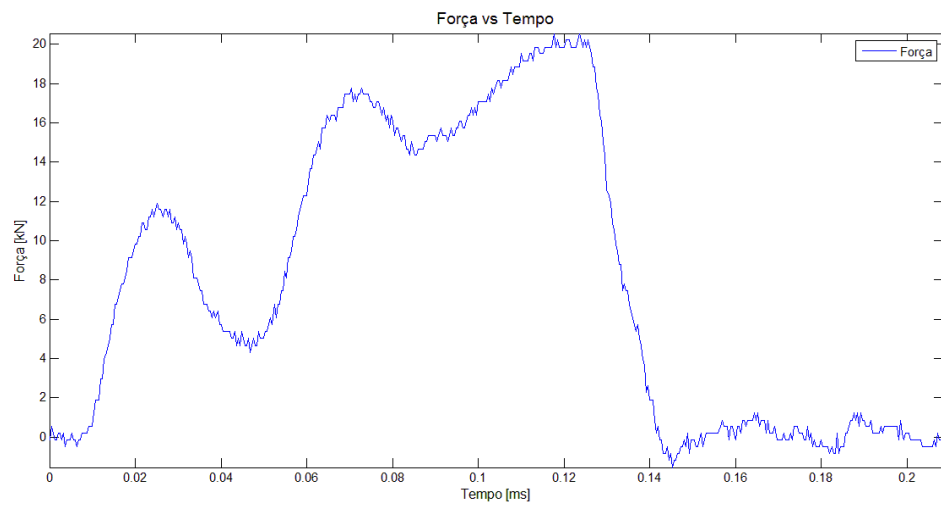
As curvas *força vs tempo* apresentadas nas figuras de 81 a 83 não foram sujeitas a nenhum tratamento digital, a fim de não modificar o comportamento original do carregamento.

Para cada condição foram realizados três ensaios, a fim de verificar se há alguma repetitividade no comportamento da curva.

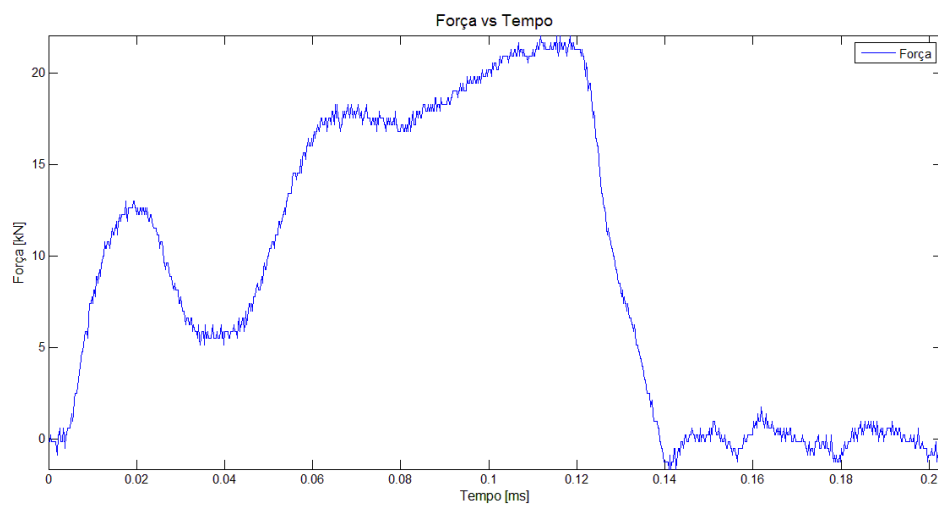
Ao comprar as figuras 81, 82 e 83, nota-se que a intensidade das interferências tende a aumentar à medida que o comprimento do corpo de prova aumenta, já que as oscilações tornam-se mais evidentes.

Apenas através da observação dos gráficos da figura 83-a e 83-b não é possível afirmar se ao longo do ensaio o corpo de prova deixou de ter contato com o cutelo durante um reduzido espaço de tempo (intervalo entre 0,05 ms e 0,10 ms nas imagens, no qual a força registrada tende a zero e depois volta a aumentar), ou se nesse intervalo as interferências causadas por efeitos inercias do martelo foram responsáveis por "mascarar" o valor real da força exercida sobre o corpo de prova.

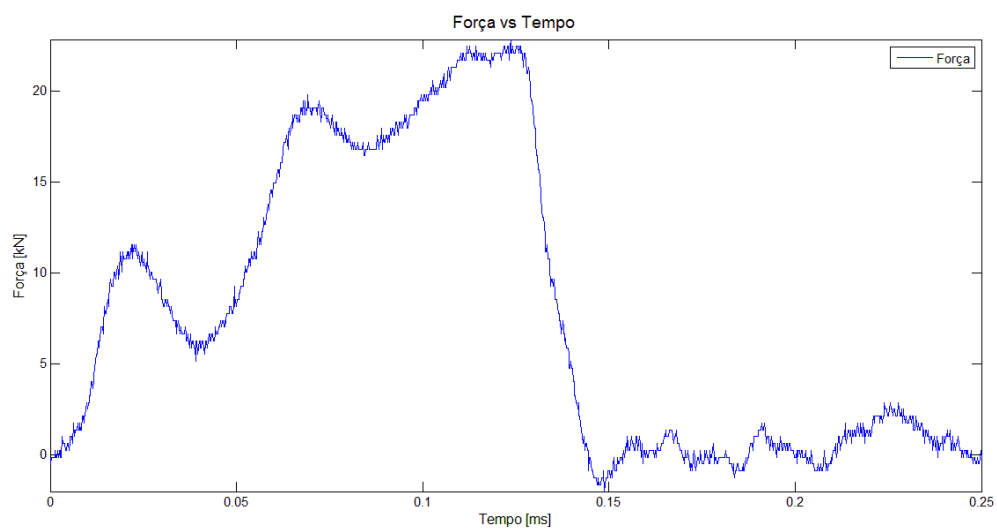
Figura 81 - (a), (b) e (c) Curva *força vs tempo*, ensaio realizado utilizando corpo de prova de 55 mm de comprimento.



(a)



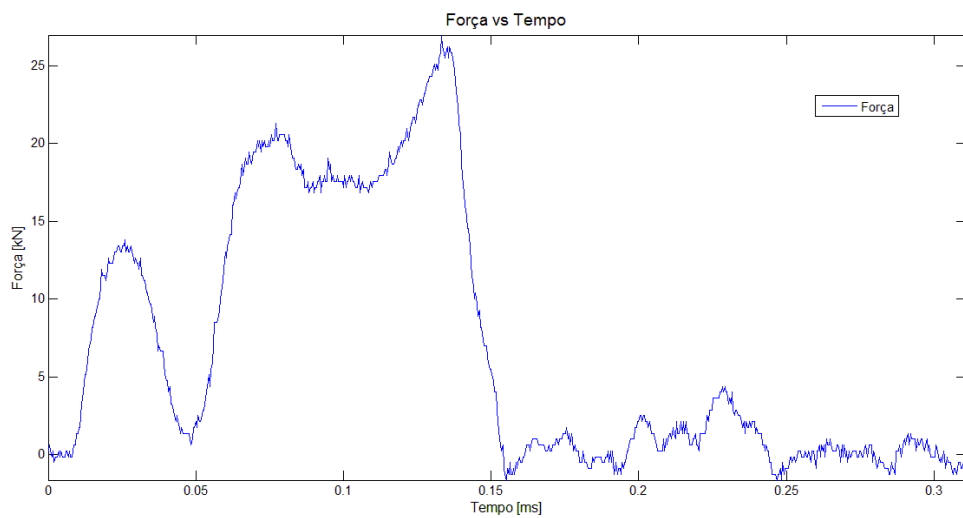
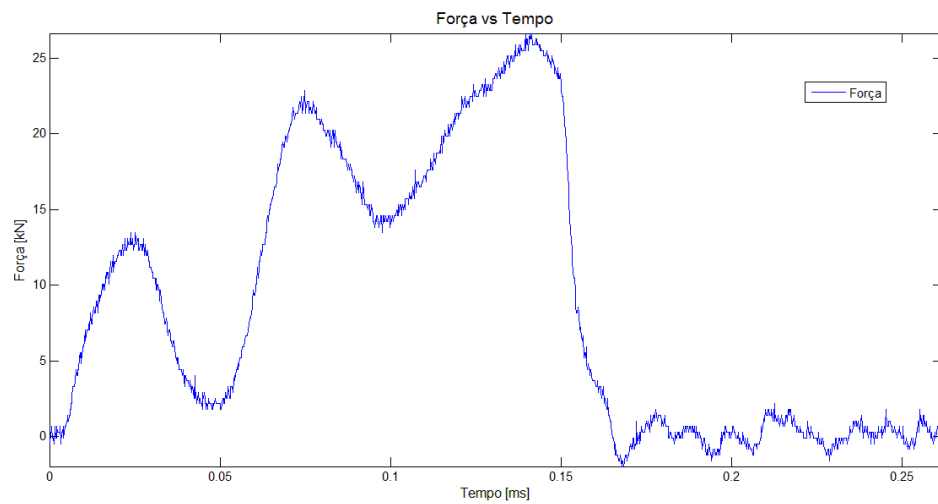
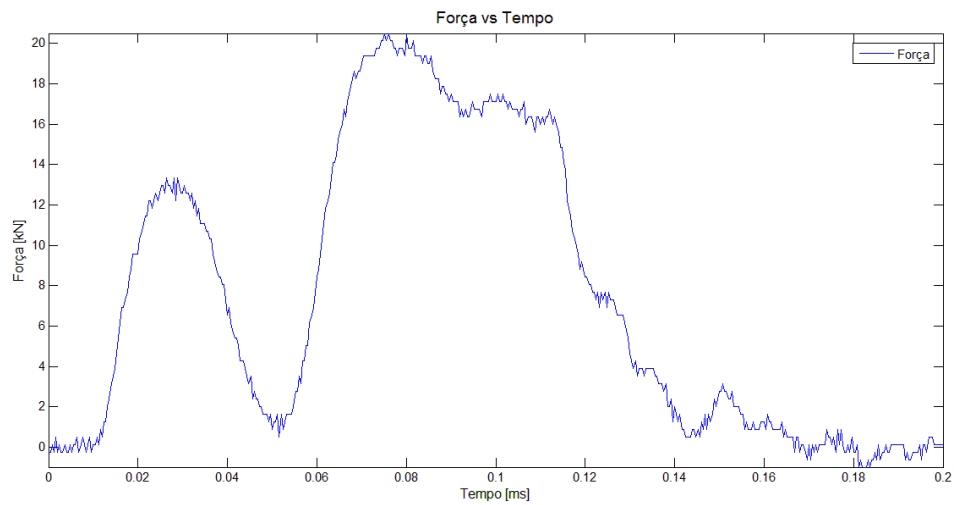
(b)



(c)

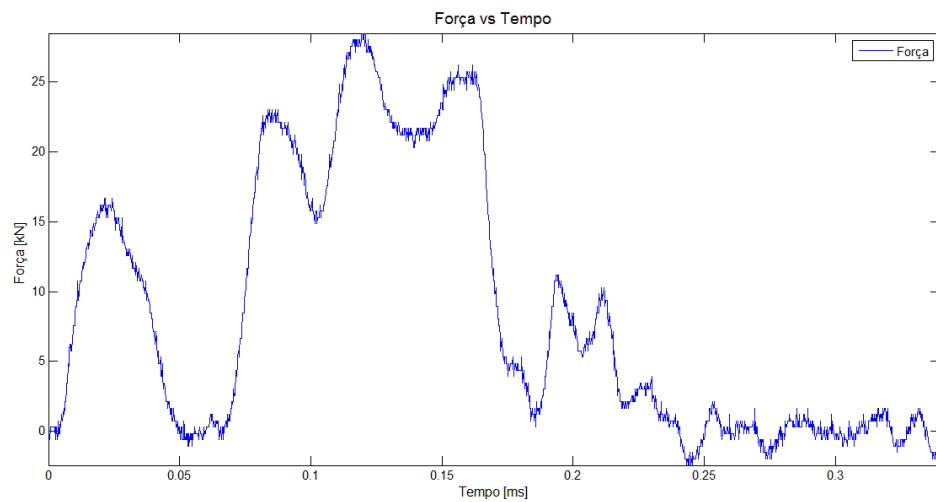
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 82 - (a), (b) e (c) Curva *força vs tempo*, ensaio realizado utilizando corpo de prova de 70 mm de comprimento.

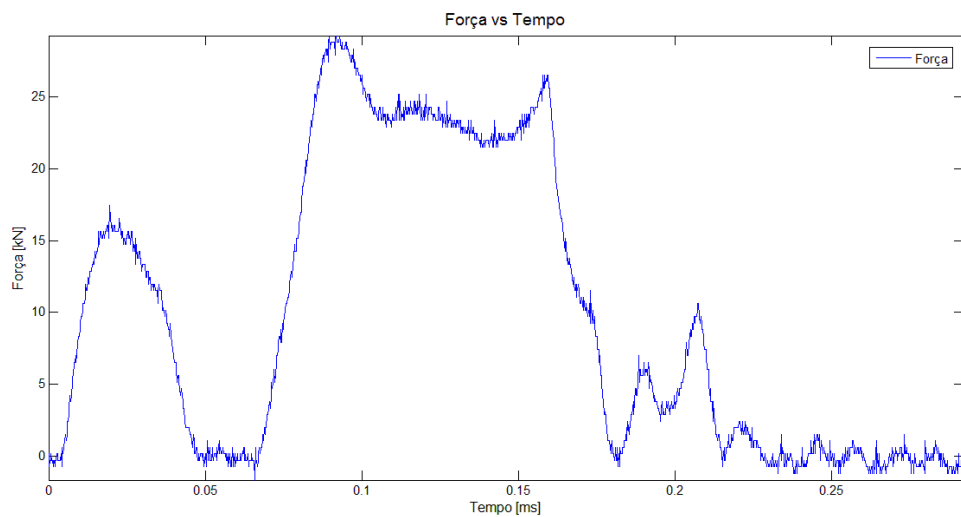


Fonte: Elaboração do autor.

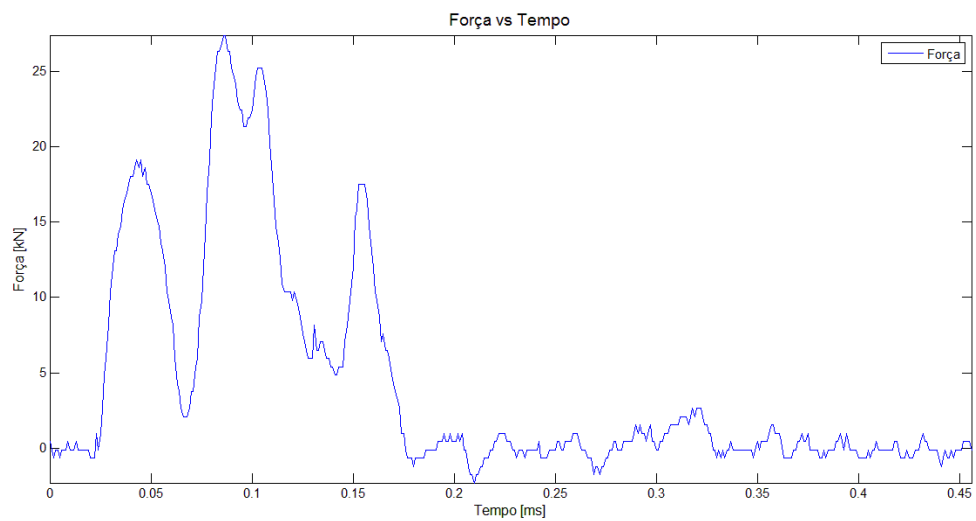
Figura 83 - (a), (b) e (c) Curva *força vs tempo*, ensaio realizado utilizando corpo de prova de 85 mm de comprimento.



(a)



(b)



(c)

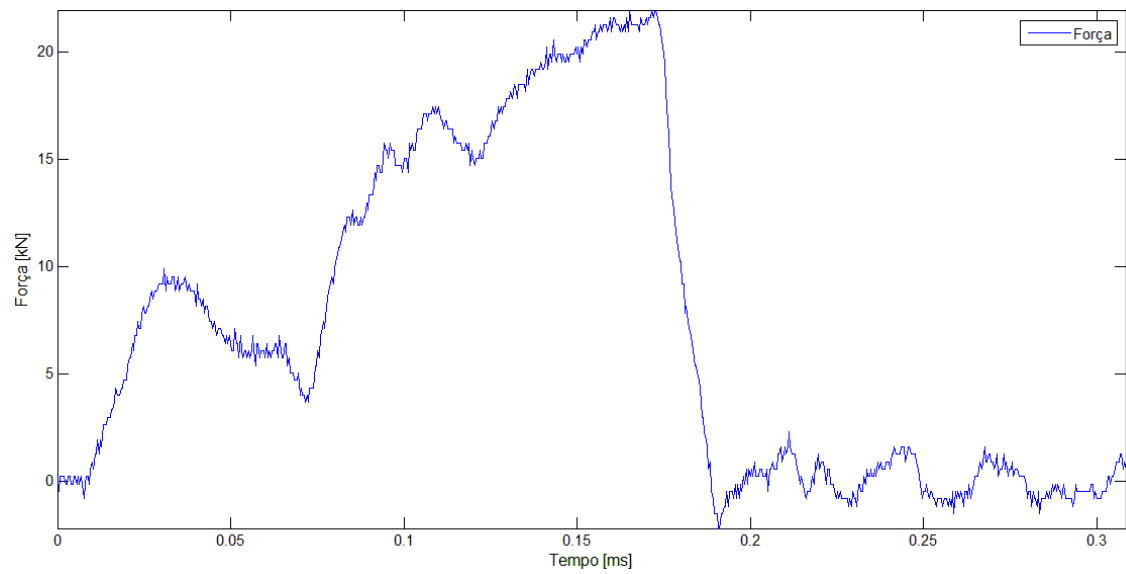
Fonte: Elaboração do autor.

9.4 Influência da rigidez do cutelo

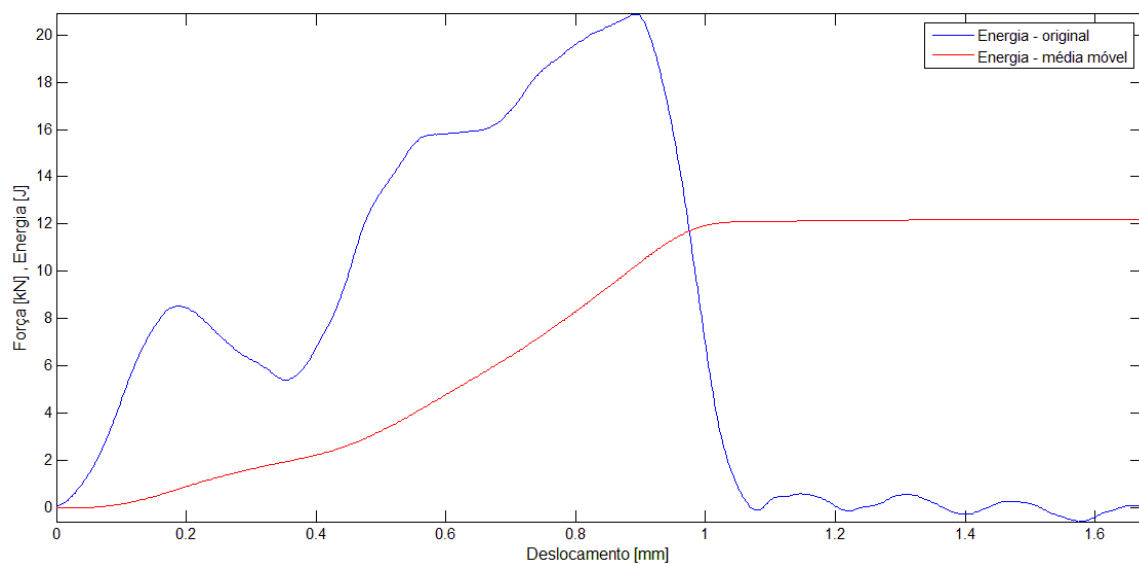
Conforme apresentado no item 7 deste estudo, um dos parâmetros responsáveis pelas flutuações nas curvas *força vs tempo* e *força vs deslocamento* é a rigidez de contato entre corpo de prova e martelo, por isso variou-se a seção do cutelo, aumentando-a em 25% e causando uma diminuição na seção em 25% sem que houvesse variação no raio de ataque do cutelo, vide figura 38 e Apêndice A do presente estudo. As figuras 84 a 86 mostram as principais diferenças no desempenho destes cutelos. Neste item foram utilizados os resultados dos ensaios com corpos de prova de aço 1040.

Observou-se que os ensaios realizados com o cutelo de maior seção apresentaram flutuações de menor magnitude em relação aos demais.

Figura 84 - Cutelo de menor rigidez: (a) *força vs tempo* e (b) *força vs deslocamento*.



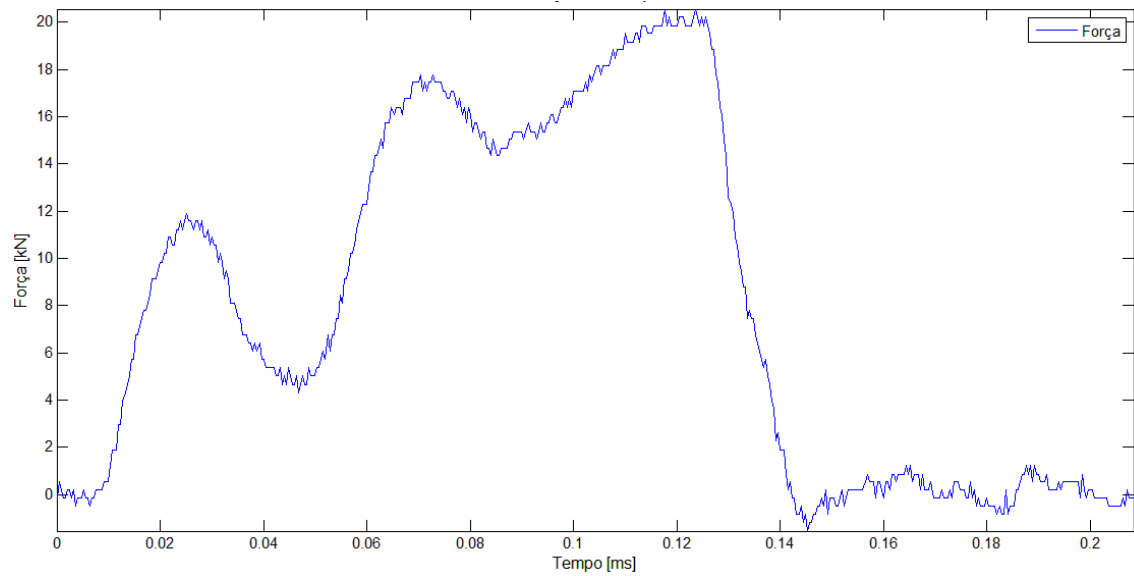
(a)



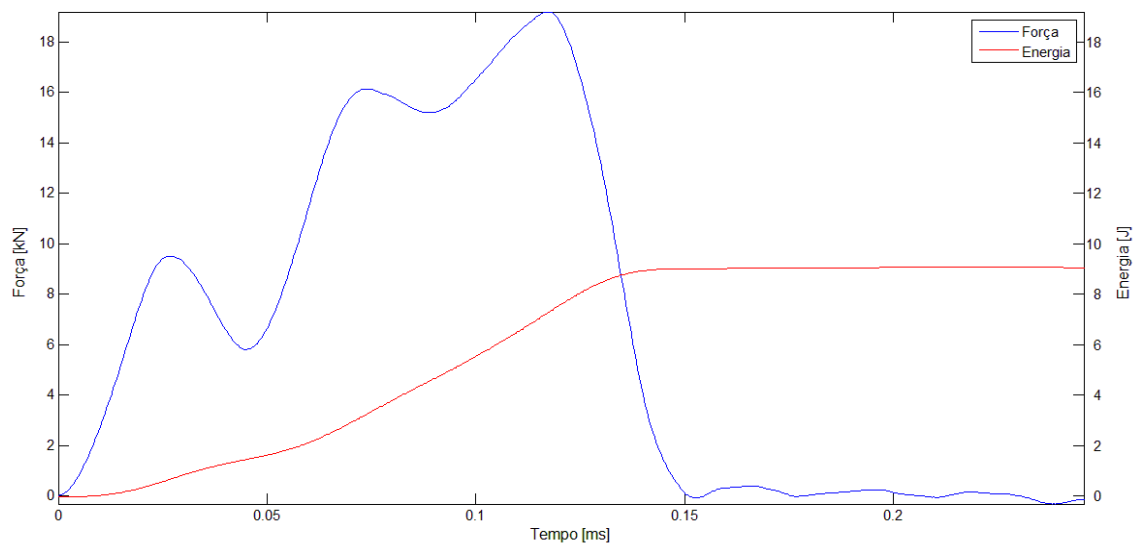
(b)

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 85 - Cutelo de rigidez intermediária: (a) *força vs tempo* e (b) *força vs deslocamento*.



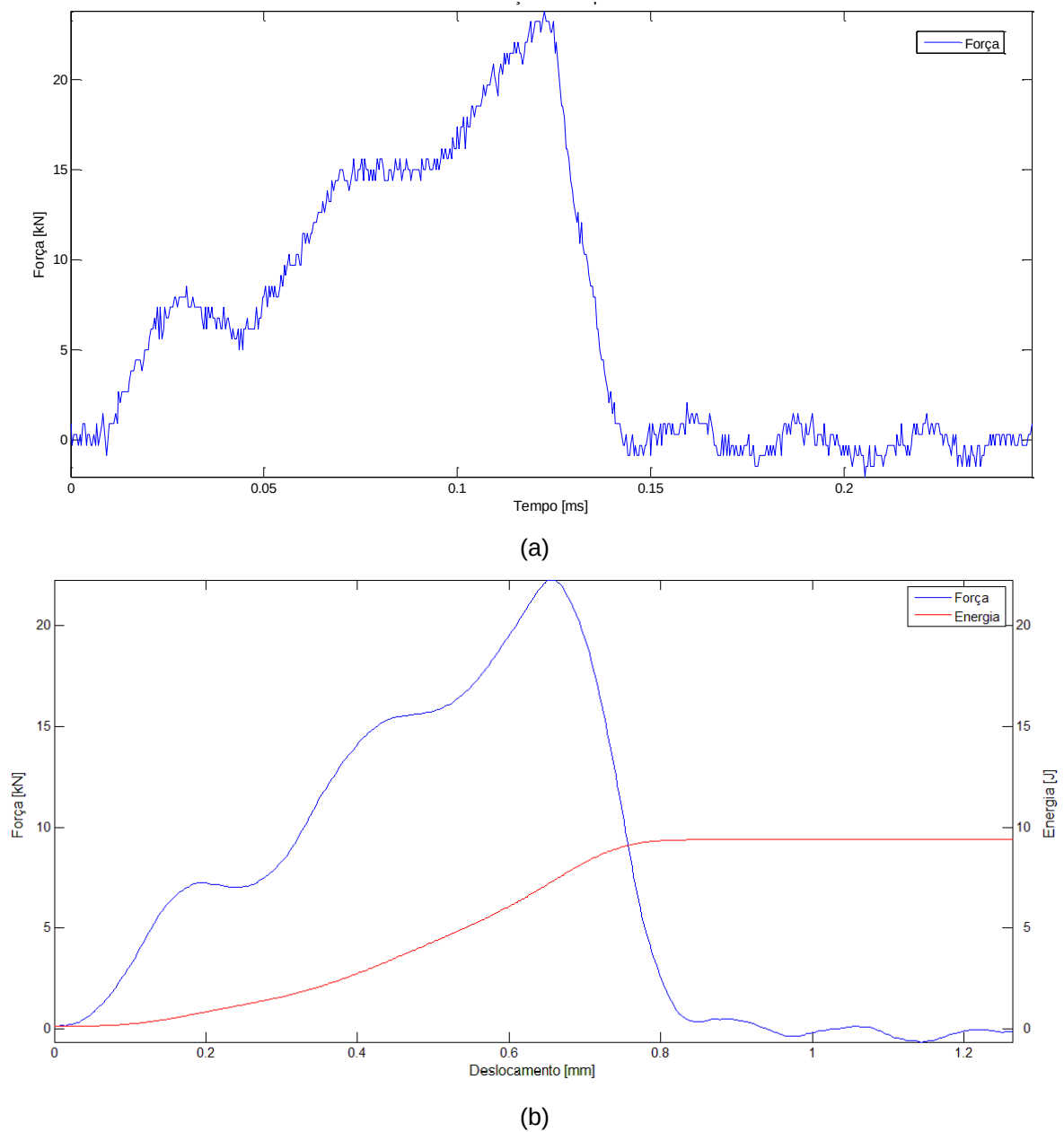
(a)



(b)

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 86 - Cutelo de maior rigidez: (a) *força vs tempo* e (b) *força vs deslocamento*.



Fonte: Elaboração do autor.

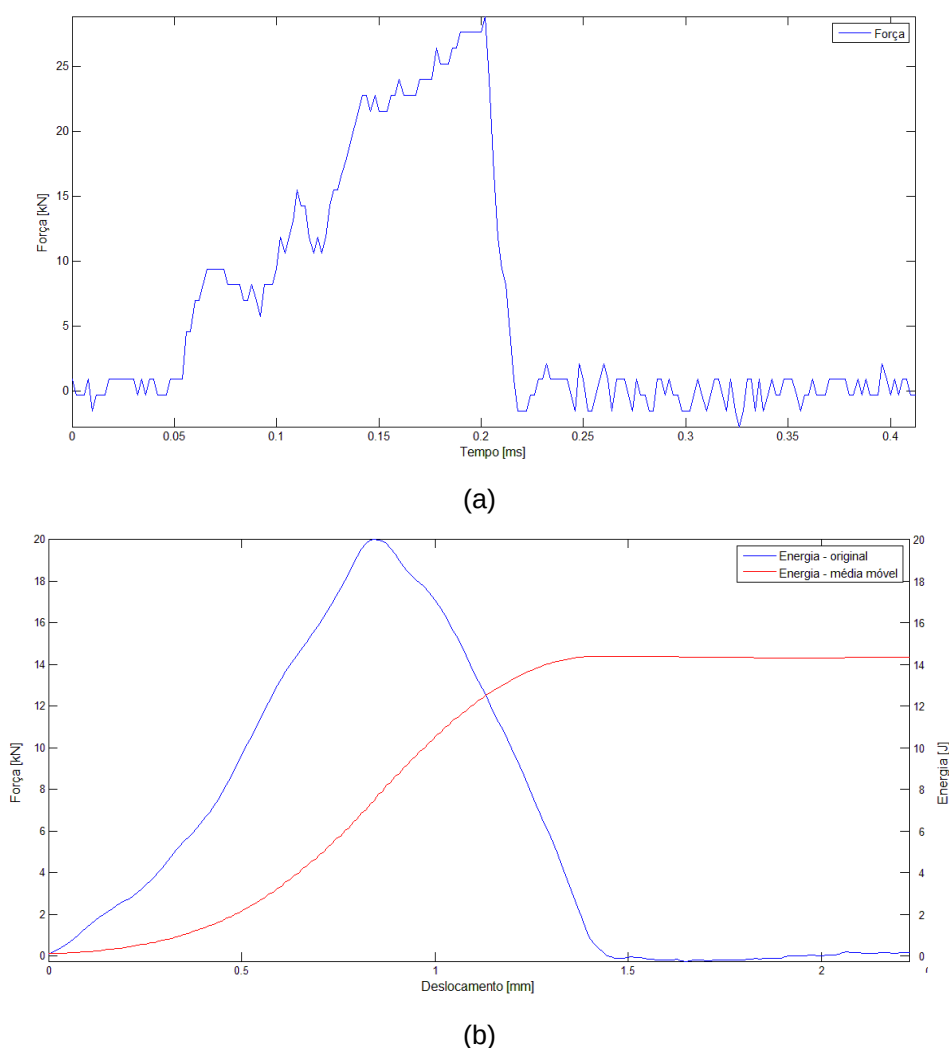
9.5 Influência da geometria do cutelo

Além de verificar o efeito causado pela variação na seção, este estudo também avaliou o efeito causado pela variação na geometria do cutelo, a figuras 87 apresenta o desempenho do cutelo GC3M-II, apresentado na figura 88.

Nota-se que o desempenho do cutelo GC3M-II foi semelhante ao do cutelo C (maior rigidez) apresentado na figura 38.

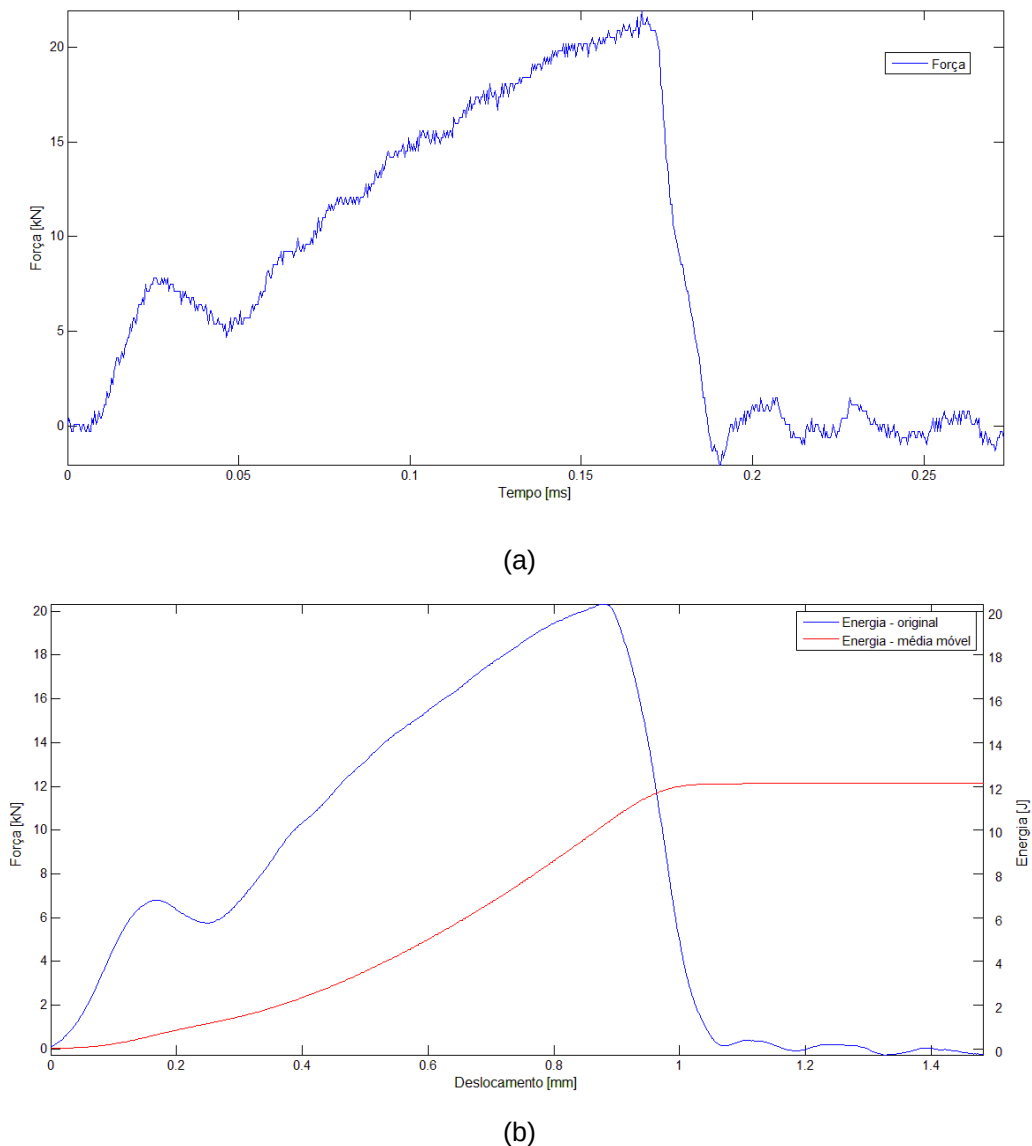
No entanto, após a aplicação do filtro média móvel, empregando o mesmo número de pontos utilizados no item 9.4 deste estudo ($M = 55$ pontos), foi possível obter as curvas apresentadas nas figuras 87 e 88. O sinal tratado, figura 88-b, praticamente não apresenta oscilações.

Figura 87 - Cutelo GC3M-II (diferente geometria): (a) *força vs tempo* e (b) *força e energia vs deslocamento*.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 88 - Cutelo GC3M-II (diferente geometria): (a) *força vs tempo* e (b) *força e energia vs deslocamento*.



Fonte: Elaboração do autor.

9.6 Influência do posicionamento dos extensômetros no cutelo

Foi possível fixar quatro extensômetros no martelo de maior rigidez, ou seja, ele passou a ser duplamente instrumentado, com um par de extensômetros fixados a 9,8 mm em relação à extremidade do cutelo e o outro par a 23,1 mm da ponta.

O sinal apresentado na figura 89 mostra o resultado obtido através dos desta montagem. A tabela 6 traz informações obtidas através do ensaio com o cutelo duplamente instrumentado.

O comportamento das curvas obtidas foi semelhante. Ambas iniciam, atingem o ponto de máximo e se encerram com a fratura do corpo de prova nos mesmos instantes.

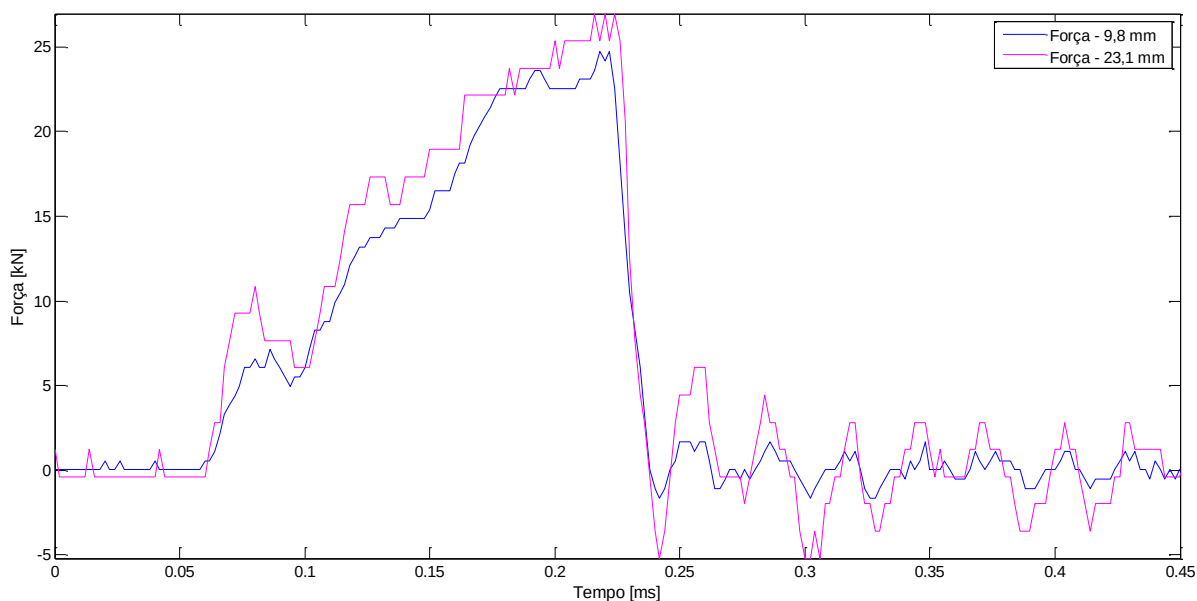
Mas, além das curvas evidenciarem o mesmo comportamento, é necessário observar que as oscilações captadas pelos extensômetros são mais intensas para o caso 23,1 mm (curva magenta), nota-se que a flutuação no valor da força é maior entre 0,05 e 0,010 ms para a curva captada com os extensômetros a 23,1 mm do que para o par posicionado a 9,8 mm da extremidade (curva azul).

Tabela 6 - Resultados obtidos através do ensaio com cutelo duplamente instrumentado.

Posição em relação a extremidade do cutelo	Energia - Dial -	Energia - Integração Numérica -	Desvio	Força máxima	Fator de calibração
[mm]	[J]	[J]	%	[kN]	[kgf/V]
9,8	18	17,45	3,03	24,73	6697,45
23,1		17,14	4,79	26,97	14363,30

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 89 - Cutelo de maior rigidez, força vs tempo, efeito do posicionamento dos extensômetros.



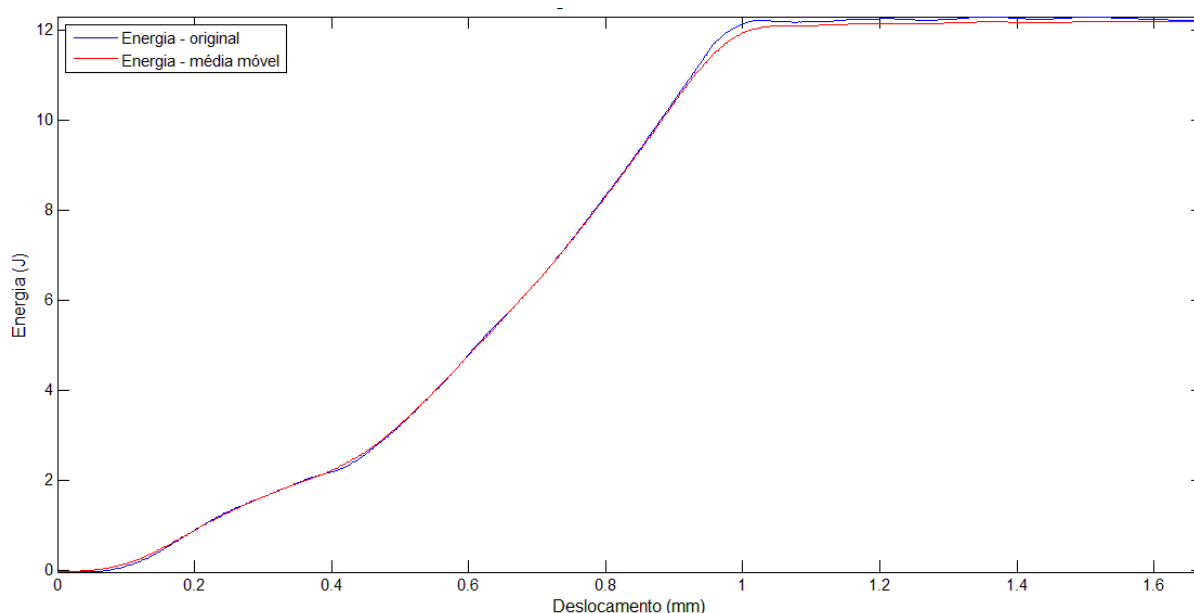
Fonte: Elaboração do autor.

9.7 Influência do tratamento do sinal sobre o cálculo da energia global de fratura

As figuras 90 a 95 apresentam uma comparação entre a energia absorvida durante o impacto antes e após o tratamento com o filtro média móvel.

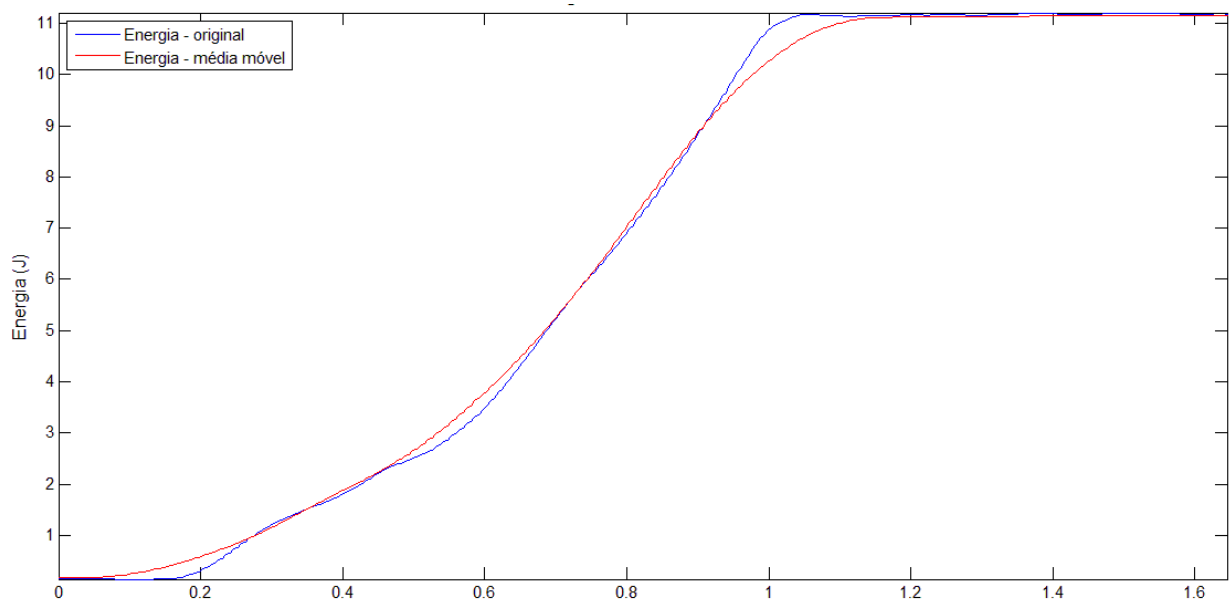
Nota-se que a curva referente ao cálculo da energia após a filtragem possui comportamento semelhante ao da curva original, ou seja, o tratamento com o filtro média móvel não afeta o valor da energia global de fratura, já que as flutuações no sinal possui valor médio nulo.

Figura 90 - Curva energia vs deslocamento, cutelo de menor rigidez.



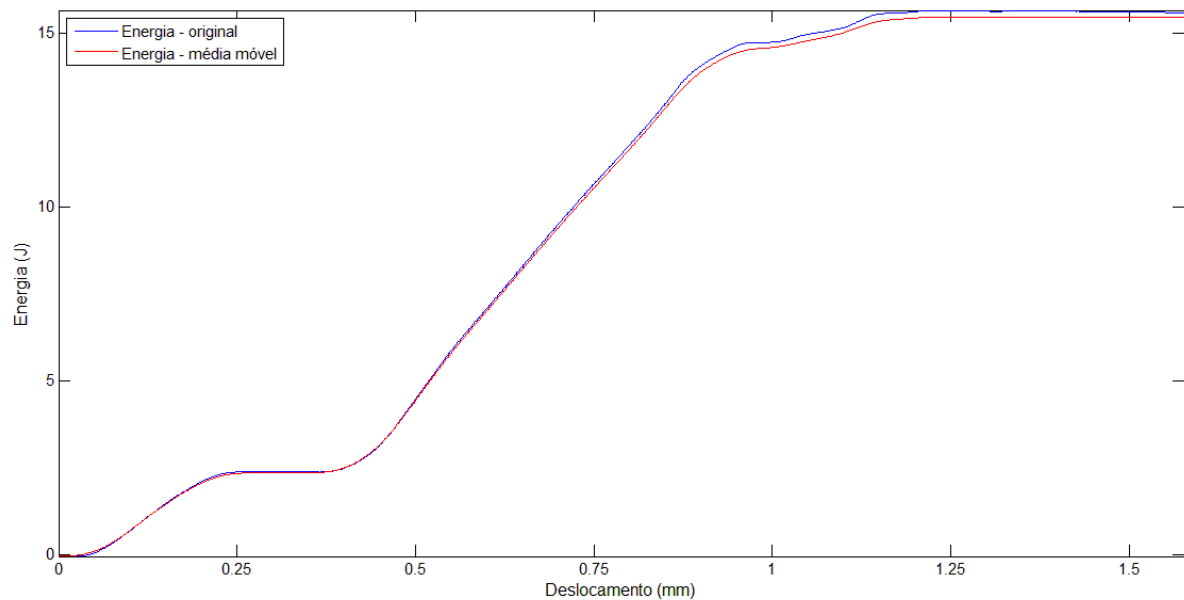
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 91 - Curva energia vs deslocamento, cutelo de rigidez intermediária, cp de 55 mm de comprimento.



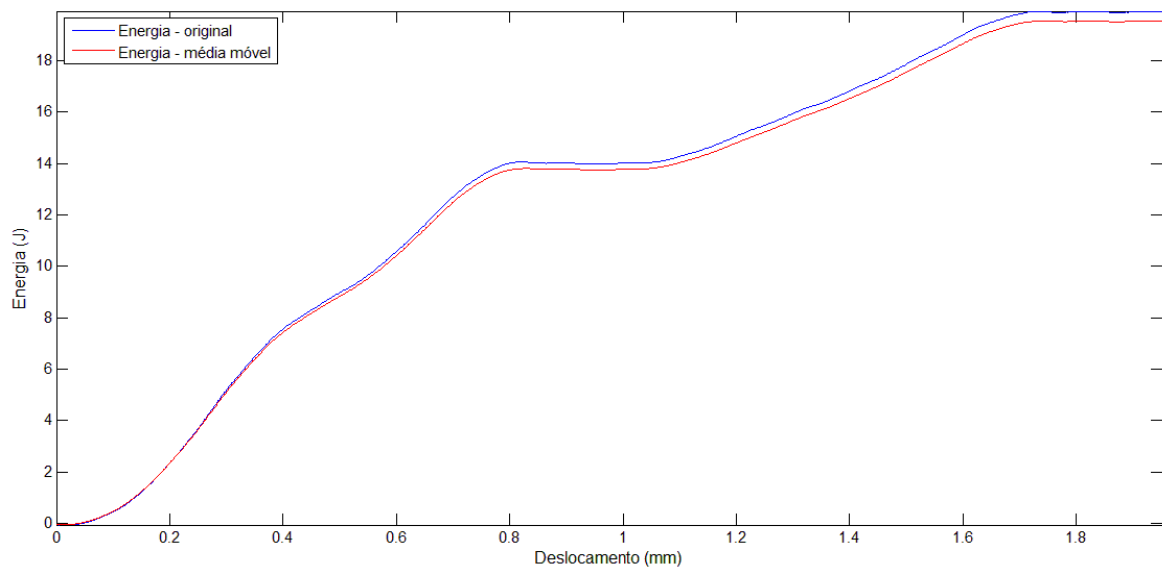
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 92 - Curva energia vs deslocamento, cutelo de rigidez intermediária, corpo de prova de 70 mm de comprimento.



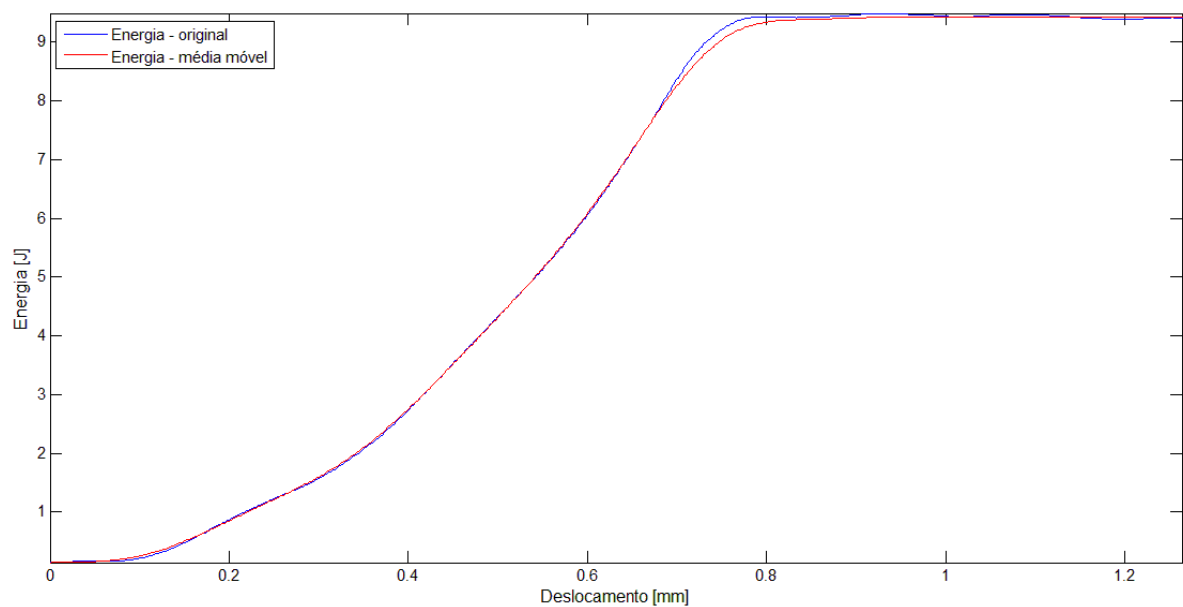
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 93 - Curva energia vs deslocamento, cutelo de rigidez intermediária, corpo de prova de 85 mm de comprimento.



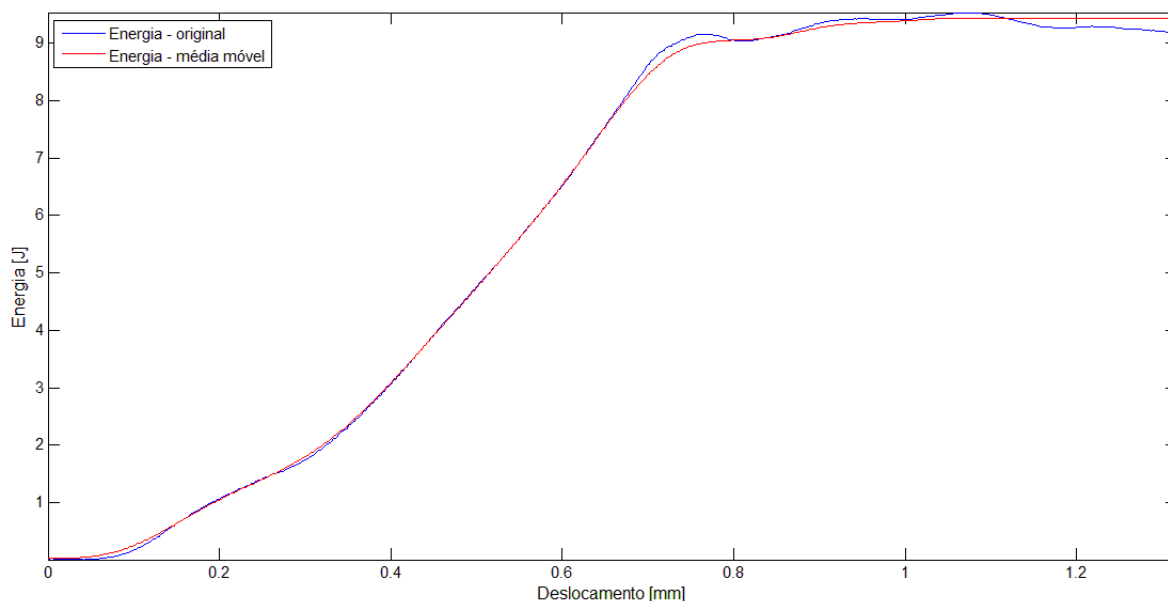
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 94 - Curva energia vs deslocamento, cutelo de maior rigidez intermediária, extensômetro posicionado a 9,8 mm da extremidade.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 95 - Curva energia vs deslocamento, cutelo de maior rigidez intermediária, extensômetro posicionado a 23,1 mm da extremidade.



Fonte: Elaboração do autor.

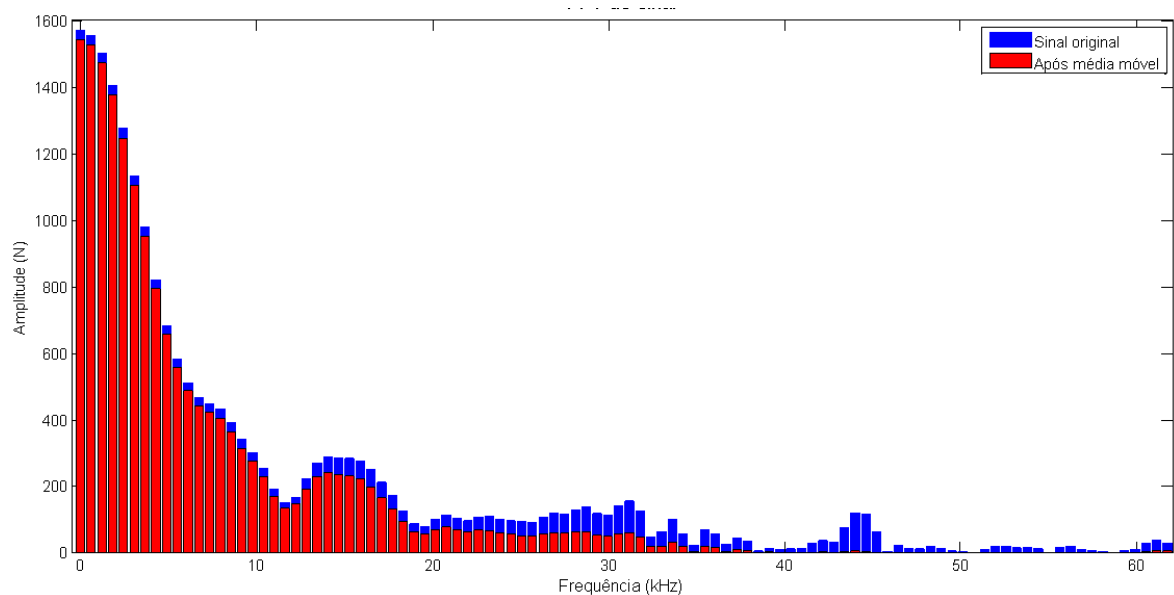
9.8 Espectro dos sinais antes e depois do tratamento com a média móvel

As figuras 96 a 101 apresentam os espectros dos sinais apresentados nos itens 9.4, 9.5, 9.6 e 9.7 deste estudo.

Ao empregar o filtro média móvel com 55 pontos houve atenuação em todas as componentes, sendo mais expressiva acima de 10 kHz. As componentes acima de 40 kHz praticamente foram eliminadas.

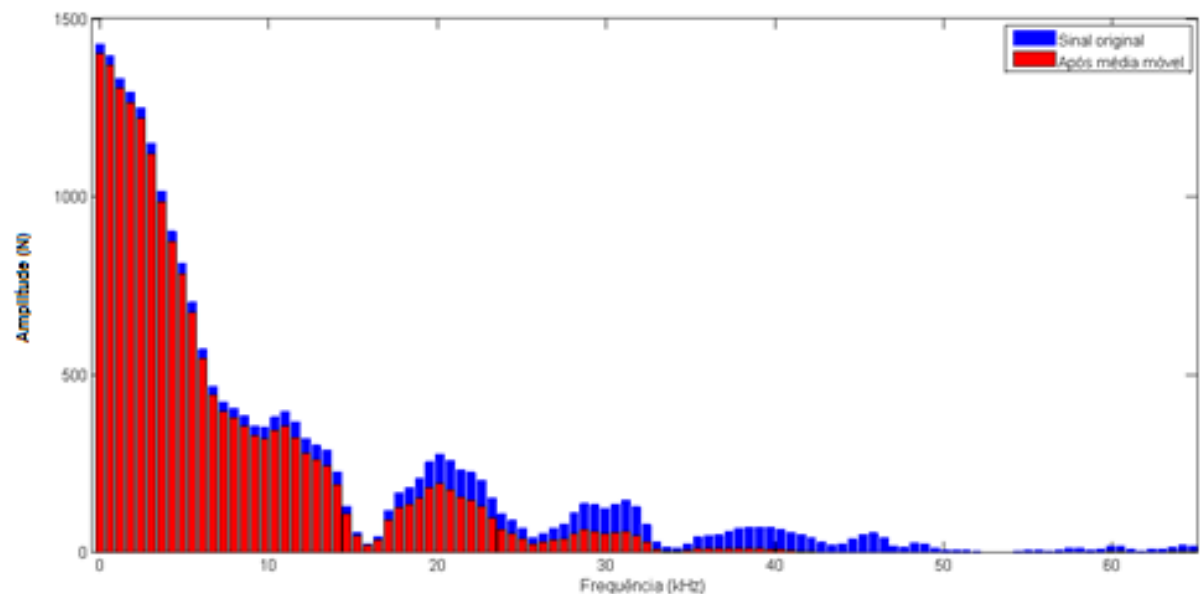
A atenuação de componentes de frequência elevada levou a uma suavização das curvas apresentadas nos itens anteriores.

Figura 96 - Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo de menor rigidez antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos).



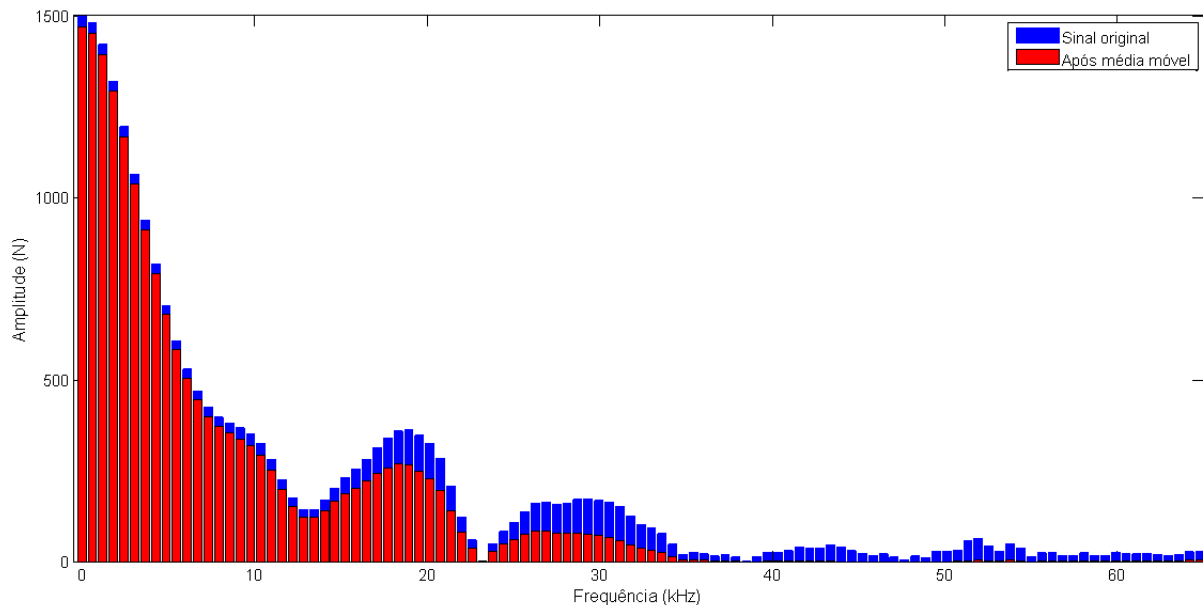
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 97 - Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo rigidez intermediária antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos).



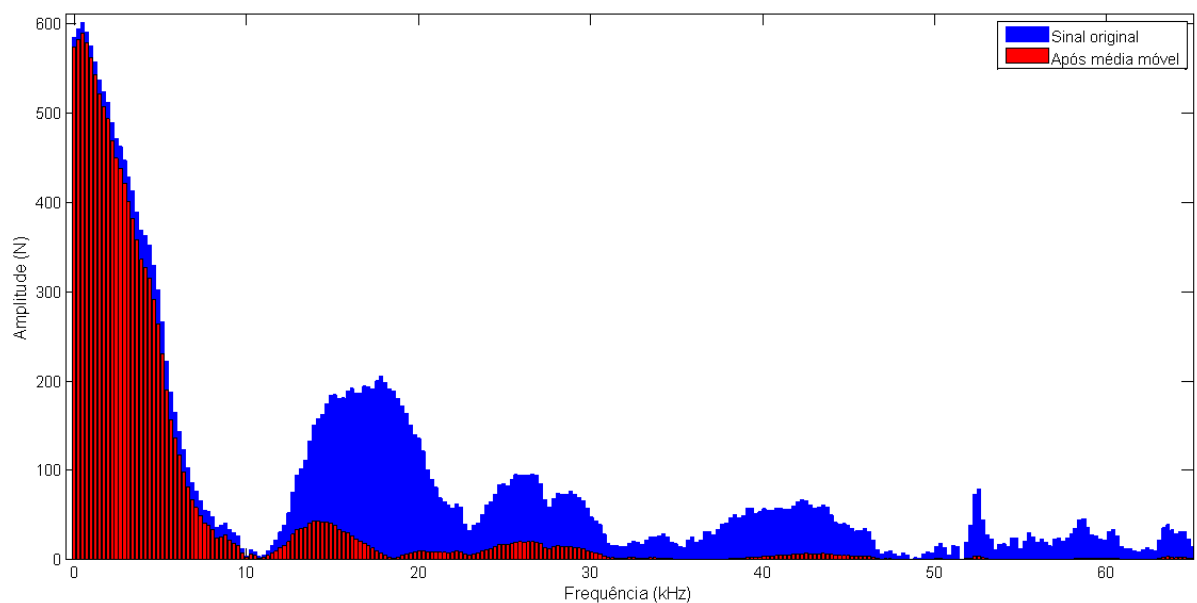
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 98 - Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo rigidez intermediária antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos), corpo de prova com 70 mm de comprimento.



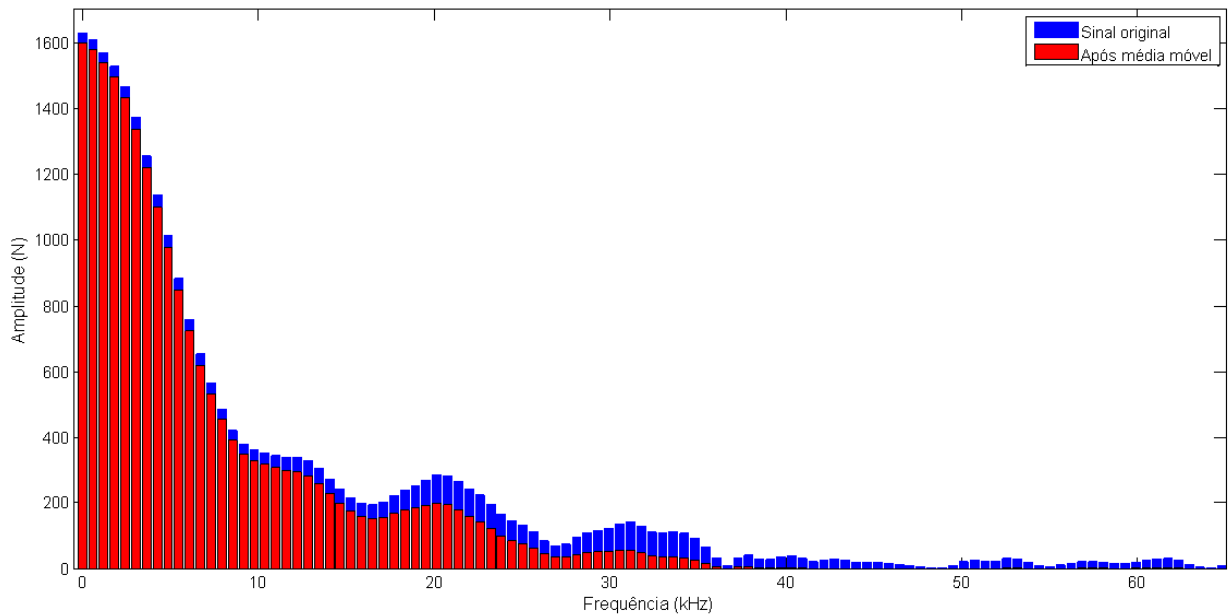
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 99 - Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo rigidez intermediária antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos), corpo de prova de 85 mm de comprimento.



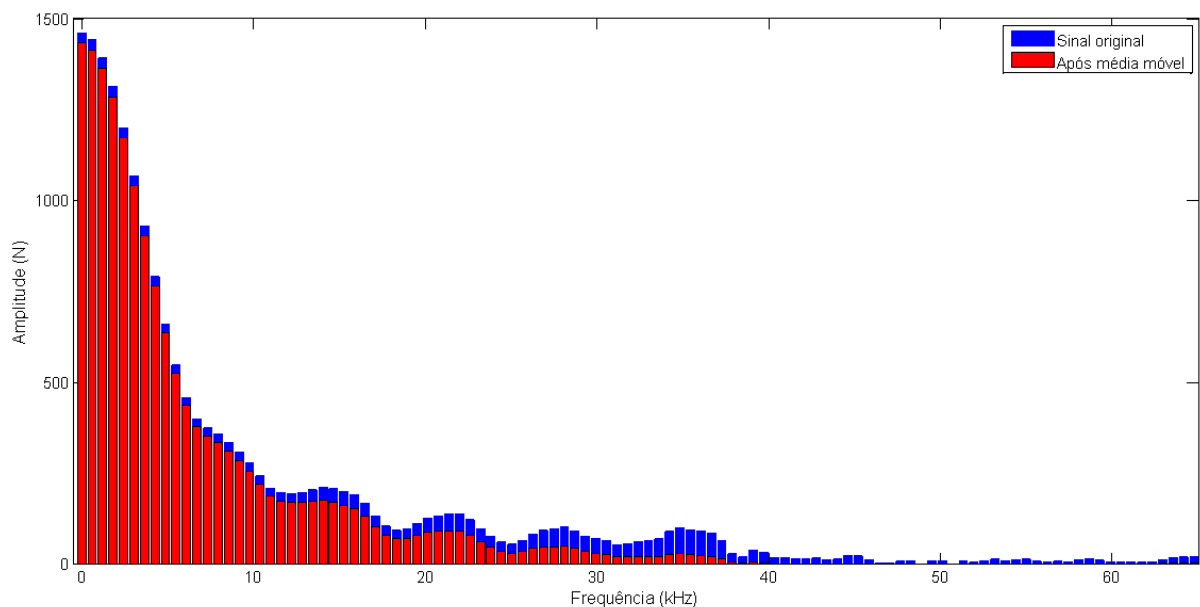
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 100 - Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo de maior rigidez antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos).



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 101 - Espectro do sinal obtido ao realizar o ensaio empregando o cutelo de diferente rigidez antes e após o tratamento com o filtro média móvel (fazendo M=55 pontos).

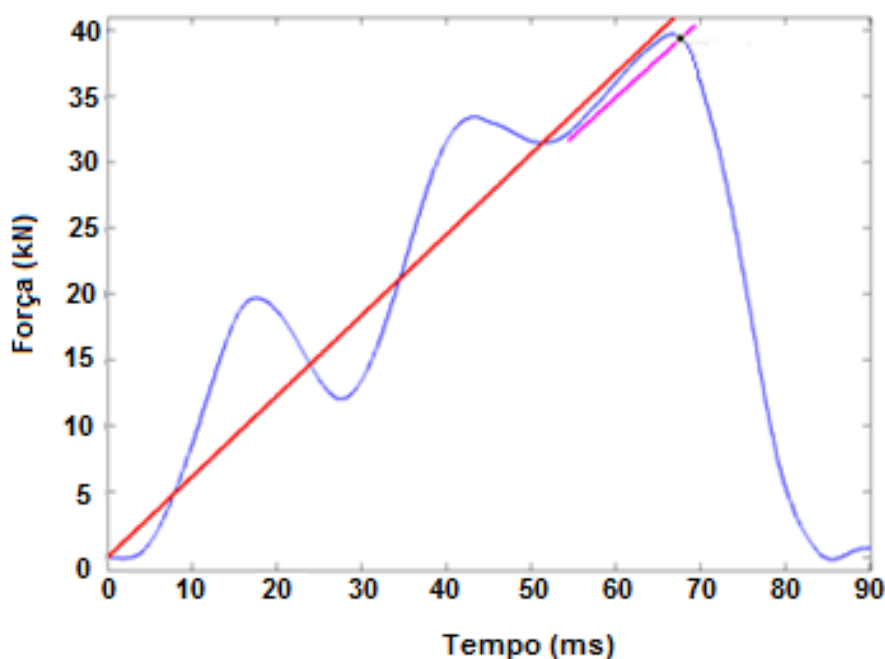


Fonte: Elaboração do autor.

9.9 Tenacidade à fratura dinâmica (K_{Id})

Uma vez que as curvas força vs deslocamento foram tratadas, então procurou-se estimar o valor da tenacidade à fratura dinâmica. O método utilizado consiste em estimar a região da curva força vs deslocamento onde ocorre deformação elástica (linear), então foi traçada uma reta a partir do instante em que o cutelo está na iminência de colidir com o corpo de prova, então a rotina computacional marca o primeiro ponto na curva força vs deslocamento que corresponde a uma variação de 5% em relação a curva traçada, como apresentado na figura 102.

Figura 102 - Curva força vs deslocamento (azul), curva com mesma inclinação da região elástica (vermelha), variação de 5% em relação à reta guia (magenta).



Fonte: Elaboração do autor.

As tabelas 7 a 10 apresentam os valores obtidos a partir dos corpos de prova de aço 1040 para os ensaios com diferentes cutelos e utilizando corpos de prova com diferentes comprimentos.

Tabela 7 – Resultados dos ensaios empregando o cutelo de menor rigidez (tipo A).

CP	Energia dial [KV]	Energia integração numérica [Wt]	Desvio (%)	Variação	Energia de iniciação de trinca	Força máxima	Tenacidade à fratura dinâmica aparente
	[J]	[J]	(%)	[J]	[J]	[kN]	[MPa.m ^{1/2}]
55 mm	13	12,19	6,26	0,81	10,145	20,880	97,351
	16	15,91	0,58	0,09	14,256	22,852	106,546
	11	9,86	10,41	1,15	8,614	19,308	90,025
Média	13,30	5,75	5,75	0,68	11,01	21,01	97,97

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios empregando o cutelo de rigidez intermediária (tipo B) utilizando corpos de prova de 55 mm, 70 mm e 85 mm de comprimento.

CP	Energia dial [KV]	Energia integração numérica [Wt]	Desvio (%)	Variação	Energia de iniciação de trinca	Força máxima	Tenacidade à fratura dinâmica aparente
	[J]	[J]	(%)	[J]	[J]	[kN]	[MPa.m ^{1/2}]
55 mm	12	11,26	6,18	0,74	7,79	18,37	85,65
	10	9,07	9,30	0,93	7,55	19,19	89,49
	9,5	8,09	14,80	1,41	6,43	16,93	78,93
Média	10,50	9,47	10,09	1,03	7,26	18,16	84,69
70 mm	11,5	10,88	5,37	0,62	9,24	21,58	100,60
	-	8,27	-	-	3,77	18,89	88,09
	12,5	11,71	6,33	0,79	9,70	22,76	106,10
	14	12,65	9,64	1,35	11,24	25,18	117,42
	13	12,04	7,38	0,96	10,38	23,66	110,31
Média	12,75	11,82	7,18	0,93	10,14	23,30	108,61
85 mm	11	10,46	10,46	0,54	5,06	18,18	84,78
	16	15,47	15,47	0,53	5,32	27,82	129,70
	20	19,54	19,54	0,46	3,78	29,08	135,59
	13	12,27	12,27	0,73	8,96	28,58	133,23
	16	15,59	15,59	0,41	7,90	27,07	126,20
Média	15,20	14,67	14,67	0,53	6,20	26,15	121,90

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios empregando o cutelo de maior rigidez (tipo C).

CP	Energia dial [KV]	Energia integração numérica [Wt]	Desvio (%)	Variação	Energia de iniciação de trinca	Força máxima	Tenacidade à fratura dinâmica aparente
	[J]	[J]	(%)	[J]	[J]	[kN]	[MPa.m ^{1/2}]
55 mm	10	9,42	5,80	0,58	7,73	22,26	103,77
	18	17,45	3,06	0,55	9,923	24,73	94,76
Média	14	13,44	4,43	0,57	8,83	23,50	99,26
55 mm	10	9,41	5,90	0,59	7,67	19,96	93,06
	18	17,14	4,78	0,86	8,229	26,97	98,10
Média	14	13,28	5,34	0,73	7,95	23,47	95,6

Fonte: Elaboração do autor.

Obs: os dados das duas primeiras linhas referem-se aos dos extensômetros colados a 9,8 mm da extremidade e as dados abaixo se referem aos dos extensômetros a 23,1 mm.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios empregando o cutelo GC3M-II.

CP	Energia dial [KV]	Energia integração numérica [Wt]	Desvio (%)	Variação	Energia de iniciação de trinca	Força máxima	Tenacidade à fratura dinâmica aparente
	[J]	[J]	(%)	[J]	[J]	[kN]	[MPa.m ^{1/2}]
55 mm	16	15,10	5,65	0,90	8,35	20,04	93,42
	13	12,15	6,51	0,85	8,25	20,33	94,81
	10	9,05	9,47	0,95	8,08	17,96	83,72
Média	13,00	12,10	7,21	0,90	8,23	19,44	90,65

Fonte: Elaboração do autor.

Ao todo foram analisadas 22 amostras e, embora os parâmetros do ensaio tenham variado, nota-se que a energia global de fratura média segundo o dial da máquina de ensaio é igual a $13,28 \pm 2,90$ J, através da integração numérica igual a $12,39 \pm 3,22$ J, ou seja, uma variação de aproximadamente 6,7% em relação ao valor do dial, não sendo necessário fazer ajustes na máquina de ensaio, pois as perdas de aproximadamente 0,90 J forem inferiores a 5,00 J.

O valor médio da força máxima durante o impacto foi igual a $22,29 \pm 3,72$ kN, a energia de iniciação de trinca média igual a $8,19 \pm 2,17$ J, e a tenacidade à fratura

média igual a $101,81 \pm 16,55$ MPa. $\sqrt{m}$, percebe-se uma elevada dispersão neste último, calculado através do método proposto pela

9.10 Relação Sinal Ruído (RSR) e influência da fonte de alimentação

Decidiu-se avaliar qual a relação sinal-ruído nos sinais obtidos e qual a influência da fonte de alimentação sobre o mesmo, para determinar se a rede elétrica (127 V_{AC} | 60 Hz) exerce alguma influência nos sinais coletados.

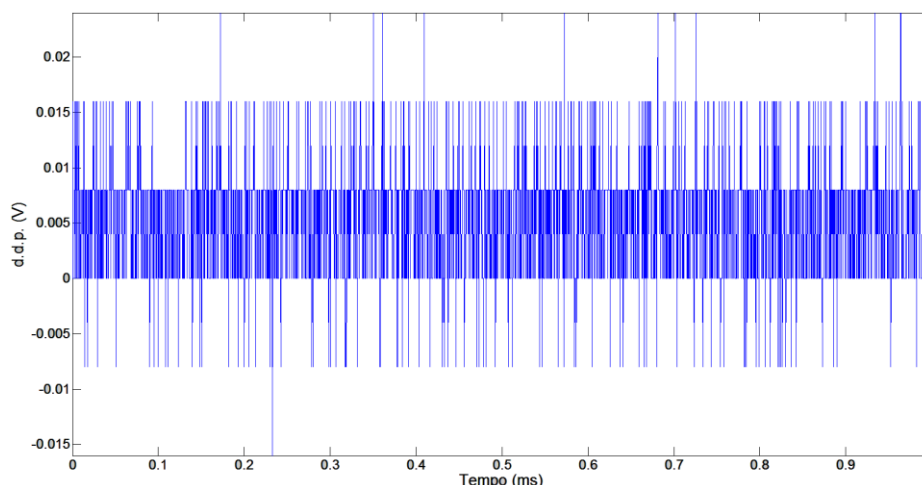
Por isso, foram coletados dados dos sinais na saída da cadeia de medição, sem que houvesse qualquer carregamento no cutelo.

A figura 103 mostra o sinal obtido com a cadeia ligada à rede elétrica, a figura 104 com a cadeia ligada a UPS (*uninterruptible power supply*, conhecido comercialmente no Brasil como *no-break*) e com a cadeia ligada a UPS ligada à rede elétrica, figura 105.

A relação sinal-ruído (RSR) foi calculada da seguinte forma:

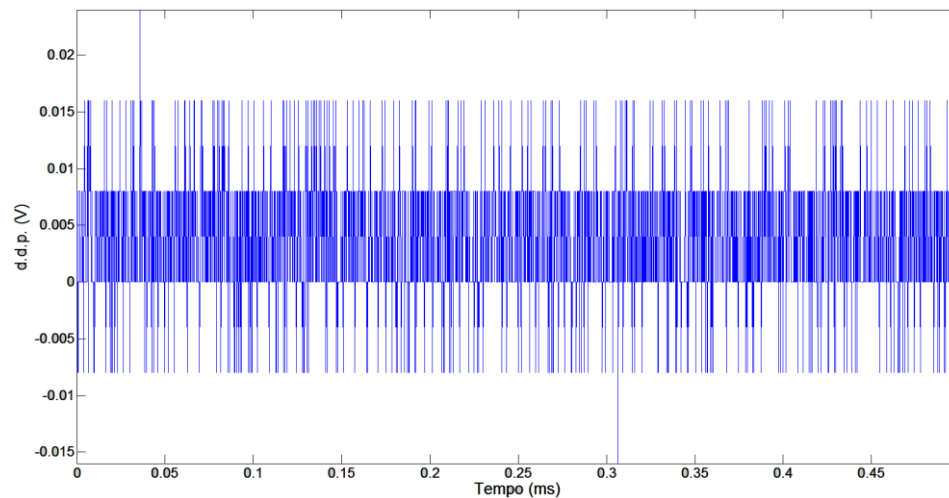
- Sinal: como sendo a curva *força vs tempo* tratada pela média móvel, com M = 55 pontos.
- Ruído: 2500 dados amostrados em 996 μ s sem que houvesse carga aplicada no cutelo.
- A autocorrelação (R_x) dos sinais foi calculada utilizando o comando *xcorr* do Matlab[®].

Figura 103 - Ruído de fundo com cadeia de medição ligada à rede elétrica 127V_{AC} | 60 Hz.



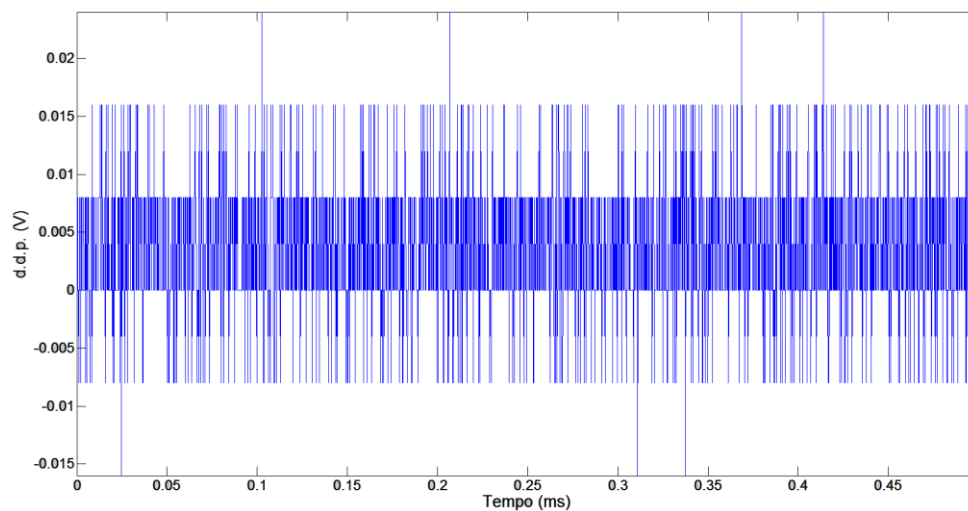
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 104 - Ruído de fundo com cadeia de medição ligada a UPS.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 105 - Ruído de fundo com cadeia de medição ligada à UPS ligada rede elétrica 127V_{AC} | 60 Hz.



Fonte: Elaboração do autor.

Ao observar as figuras 103 a 105 não se nota nenhuma diferença considerável, pois os valores máximos (0,25 V) e mínimos (-0,20 V) foram os mesmos nos três gráficos, o valor médio das figuras 103 e 104 não é nulo devido à falta de correção de offset no condicionador de sinais.

Os cálculos a seguir foram realizados empregando-se as equações 36 e 37. Foram realizados ensaios Charpy instrumentado com as três montagens citadas, assim foi possível comparar o ruído e o sinal obtido, os resultados são os seguintes:

a) cadeia de medição ligada à rede elétrica:

$$RSR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4,091087 \times 10^{10}}{1,143320 \times 10^9} \right) = 51,073 \text{ dB}$$

b) cadeia de medição ligada a UPS:

$$RSR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4,4314332 \times 10^{10}}{1,155180 \times 10^8} \right) = 51,678 \text{ dB}$$

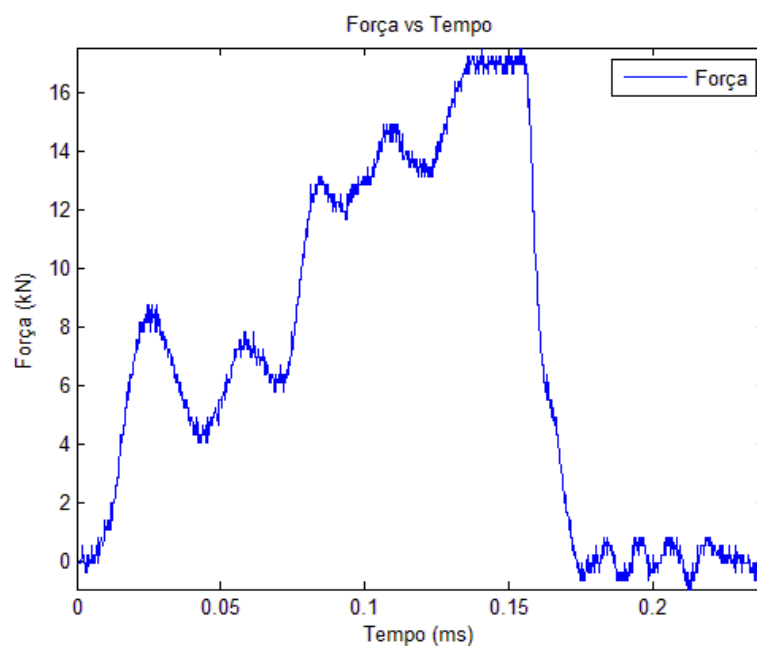
c) cadeia de medição ligada a UPS, que está ligada a rede elétrica:

$$RSR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1,293726 \times 10^{11}}{1,265568 \times 10^8} \right) = 60,191 \text{ dB}$$

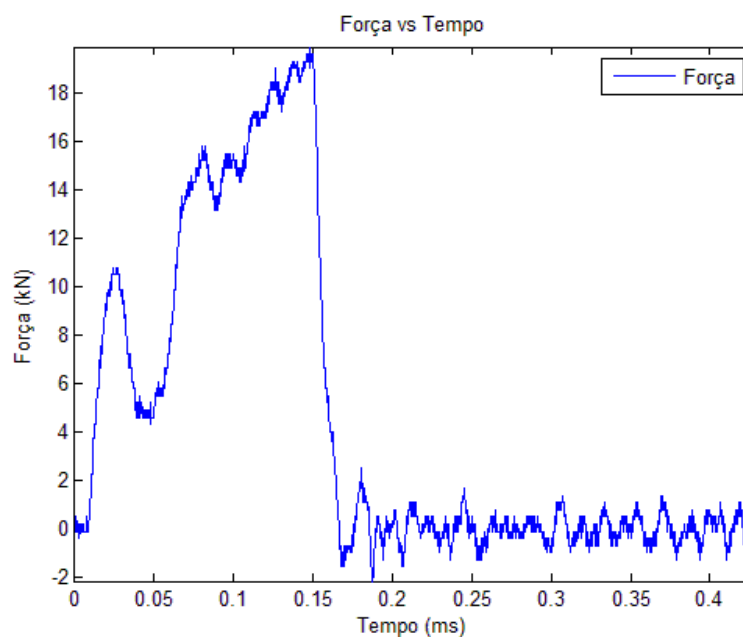
.

Aparentemente o uso da UPS na alimentação aponta para uma melhoria na relação entre sinal e ruído de fundo, porém a figura 106 apresenta as curvas força vs deslocamento com uso do UPS e com UPS ligado a rede e não se nota uma diferença significativa nos sinais.

Figura 106 - Curvas força vs deslocamento: (a) alimentação com UPS e (b) com UPS ligado à rede elétrica.



(a)



(b)

Fonte: Elaboração do autor.

10 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados no item 10 deste estudo conclui-se que:

- a) os extensômetros captam a resposta ao impacto da peça na qual estão colados, logo é completamente possível admitir que os extensômetros fixados no cutelo da máquina de ensaio de impacto Charpy captam tanto o carregamento sobre o corpo de prova durante o ensaio quanto a resposta do próprio cutelo ao impacto (efeitos inerciais);
- b) as curvas força vs tempo antes dos tratamentos (assim como captadas) mostram a presença de ruído de fundo (ruído branco). porém, como apresentado no item 9.10, a relação sinal ruído (rsr) aponta que a magnitude do sinal de interesse é muito superior a do ruído, logo a magnitude do ruído não é relevante em relação ao sinal;
- c) a substituição da fonte de alimentação (rede elétrica por ups) não causou nenhuma mudança significativa, logo a magnitude das interferências e do ruído de fundo captados pela máquina de ensaio de impacto instrumentada em questão não tem relação com a fonte de alimentação, pois se devem às conexões e cabos utilizados e aos equipamentos da cadeia de medição;
- d) através da análise feita com diversos filtros digitais (passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e média móvel) é possível concluir que o espectro da resposta ao impacto (para os materiais analisados) encontra-se entre 100 hz e 50 khz e que as principais componentes responsáveis pelas oscilações no sinal encontram-se entre 10 khz e 50 khz;
- e) a frequência de amostragem do conversor a/d da cadeia de medição deve ser igual ou superior a 100 khz para que não ocorra *aliasing*, pois as componentes mais significativas do sinal encontram-se abaixo de 50 khz, pelo teorema de nyquist a frequência de amostragem deve ser no mínimo o dobro da componente de maior frequência do sinal, ou seja, 100 khz;
- f) o filtro média móvel mostrou-se eficaz para a suavização das curvas, pois sua implementação é relativamente simples e de baixo custo computacional, porém é necessário utilizar um número de pontos reduzido

para não eliminar componentes fundamentais do sinal, pois quanto maior o número de pontos utilizados na média móvel menor se torna a frequência de corte, ou seja, corre-se o risco de atenuar o sinal de interesse;

- g) dentre os cutelos de diferente rigidez, o que apresentou o melhor desempenho foi o da condição de maior rigidez, pois as oscilações no sinal tornaram-se consideravelmente menores em relação as dos demais, por isso pode-se concluir que a rigidez do cutelo exerce influência sobre o comportamento das curvas força vs tempo e força vs deslocamento e que o aumento da rigidez do cutelo possui relação inversa com a amplitude da oscilação nas curvas obtidas no ensaio;
- h) a nova geometria de cutelo adotada se mostrou vantajosa, pois ao realizar o tratamento com o filtro média móvel as curvas força vs deslocamento apresentaram um comportamento com reduzidas oscilações, em alguns casos a força cresceu quase que linearmente até uma região próxima ao seu ponto de máximo após a filtragem, portanto a geometria do cutelo também exerce influência sobre os resultados;
- i) a intensidade das flutuações na curva força vs deslocamento cresceu significativamente ao aumentar o comprimento dos corpos de prova, de modo que o corpo de prova indicado pela norma astm e-23 (1996) apresentou o melhor desempenho dentre os ensaiados e, portanto, foi considerado adequado para a realização do ensaio charpy instrumentado, com base nessas informações conclui-se que as flutuações nas curvas força tempo e força vs deslocamento são diretamente proporcionais ao comprimento do corpo de prova;
- j) uma vez que a magnitude da flutuação no sinal se alterou ao realizar modificações no cutelo e no comprimento do corpo de prova, então isto significa que estas interferências são decorrentes de uma reação do sistema à entrada impulsiva (impacto) e não estão relacionadas ao processo de deformação e fratura ocorrido durante o ensaio, logo as interferências podem ser controladas em função das características físicas do sistema composto pela máquina de ensaio e corpo de prova;
- k) a posição dos extensômetros no cutelo exerce influência na intensidade das interferências captadas, que se mostraram mais elevadas para o par

de extensômetros mais ao centro (em relação ao comprimento) do cutelo do que em relação ao que estava mais próximo da extremidade;

- l) assim como esperado, a metodologia permitiu a obtenção do valor da energia global de fratura, força máxima, energia até a nucleação da trinca, tenacidade à fratura dinâmica, deslocamento, tempo de fatura. isto prova o quanto a cadeia de medição pode tornar o ensaio mais proveitoso, pois o ensaio clássico só poderia fornecer o valor da energia global de fratura;
- m) materiais dúcteis (sae 1020 e api x70) demandam um intervalo de tempo dezenas de vezes maior do que os materiais frágeis (1040 e 4340) para se fraturarem completamente, logo seria possível estabelecer uma relação entre tempo de fratura de tenacidade;
- n) a filtragem empregando a média móvel e o método utilizado para estimar o início da trinca permitiram o cálculo da tenacidade à fratura do material utilizado como referência neste estudo, porém foi detectada uma dispersão elevada no valor obtido, no entanto este foi calculado com base nos resultados dos ensaios realizados com diferentes cutelos e com corpos de prova de diferentes comprimentos, portanto seria necessário refazer os ensaios com um único modelo de cutelo e com uma quantidade expressiva de corpos de prova, com entalhes dentro dos padrões estabelecidos pela norma astm e-23 (1996), para que seja fornecido um valor de tenacidade à fratura dinâmica aparente expressivo.

Sugestões para trabalhos futuros:

- a) empregar um método experimental capaz de estimar/determinar o instante de crescimento da trinca e compará-lo ao estimado pela rotina computacional, para calibrar a rotina computacional ou testar a metodologia empregada;
- b) analisar o comportamento das oscilações presentes nas curvas força vs tempo e força vs deslocamento em função do material que constitui o corpo de prova, para determinar o quanto a amostra interfere no próprio ensaio;
- c) fazer simulação da resposta da máquina de ensaio ao impacto com os diferentes cutelos acoplados, para determinar quais os locais na superfície do cutelo estão menos sujeitos a vibrações;
- d) verificar o efeito de outras geometrias de cutelo sobre a curva força vs deslocamento, definir qual a geometria mais adequada;
- e) elaborar uma relação entre tempo de fratura e tenacidade;
- f) empregar outro sistema de medição (placa de aquisição), com frequência de amostragem adequada, e comparar os sinais obtidos e ruído de fundo.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. B.; ABDULLAH, S.; NUAWI, M. Z.; PADZI, M. M.; ZAKARIA, K. A. Experimental analysis of an instrumented Charpy impact using statistical study based data analysis. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME)**, Hershey, v. 6, n. 2, p. 260-268, 2011.
- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; de BRITO, G. A. **Extensometria básica**. Ilha Solteira: UNESP, 2004. Disponível em: <<http://www.nepae.feis.unesp.br/Apostilas/Extensometria%20basica.pdf>>, Acesso em 15 fev. 2012.
- ANGAMUTHU, K.; GUHA, B.; Abd ACHAR, D. R. G. Investigation of dynamic fracture toughness (J_{Id}) behaviour of strength mis-matched Q & T steel weldments using instrumented Charpy impact testing. **Engineering Fracture Mechanics**, Elmsford, v. 64, n. 4, p. 417-432, 1999.
- American Society for Testing and Materials. Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. **Annual book of ASTM standards: metals test methods and analytical procedures**, Danvers: ASTM, 1996. p. 136-155. (ASTM E23-96).
- AMPLIFICADOR operacional. 2007. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional>. Acesso em: 13 fev. 2012.
- BAER, W.; BÖSEL, D.; EBERLE, A.; KLINGBEIL, D. Determination of dynamic crack resistance of ductile cast iron using the compliance ratio key curve method. **Engineering Fracture Mechanics**, Elmsford, v. 77, n. 2, p. 374-384, 2009.
- BÖHME, W.; BERNAUER, G.; SCHMITT, W. Scatter of a ferritic steel in the transition region analyzed by Charpy tests and dynamic tensile tests. **Nuclear Engineering and Design**, Amsterdam, v. 188, n. 2, p. 149-154, 1999.
- BÖHME, W.; KALTHOFF, J. F. The behavior of notched bend specimens in impact testing. **International Journal of Fracture**, Freiburg, v. 20, p.R139-R141, 1982.
- CALLISTER, W. D. Falha. In: _____. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. Cap. 8, p. 129-167.
- DELFORGE, D. Y. M. **Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy**. 1994. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 1994.
- DIETER, G. E. Fratura frágil e ensaio de impacto. In: _____. **Metalurgia mecânica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1988.
- DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B. da.; NETTO, S. L. **Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

DOEBELIN, E. O. Generalized configurations and functional descriptions of measuring instruments. In: _____. **Measurement systems applications and design**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2004. p.13-39. (Series Mechanical Engineering).

EXCEL SENSORES (São Paulo). **Extensômetros Elétricos**: Codificação de extensômetros;. 201-?. Disponível em: <<http://www.excelsensor.com.br/>>. Acesso em: 13 fev. 2012.

FERREÑO, D.; LACALLE, R.; GORROCHATEGUI, I.; GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Fracture characterisation of a nuclear vessel steel under dynamic conditions in the transition region. **Engineering Failure Analysis**, Kidlington, v. 17, n. 2, p. 464-472, 2010.

FRANCO, S. **Design with operational amplifiers and analog integrated circuits**. 3. ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 2002. p. 1-59.

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

INTERNATIONAL STANDARD. **Metallic materials**: Charpy impact test: part 1: test method. Geneva; ISO, 2009. (ISO 148-1).

INTERNATIONAL STANDARD. **Metallic Materials**: Charpy impact test: part 1: verification of test machines. Geneva: ISO, 2008. (ISO 148-2).

IRELAND, D. R. Critical review of instrumented impact testing. **International conference on dynamic fracture toughness**, London, v. 1, p. 47-61, 1976.

KHARCHENKO, V. V.; KONDRYAKOV, E. A.; ZHMAKA, V. N.; BABUTSKII, A. A.; BABUTSKII, A. I. The effect of temperature and loading rate on the crack initiation and propagation energy in carbon steel Charpy specimens. **Strength of Materials**, New York, v. 38, n. 5, p. 535-541, 2006.

KOBAYASHI, T.; MORITA, S.; KIM, H. J. Progress and development in the instrumented Charpy impact test. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Weinheim, v. 32, n. 6, p. 525-531, 2001.

KRUGER, E.L. **Implementação da norma ISO 14.556 para instrumentação do ensaio Charpy convencional e comparação com nova metodologia proposta**, Ilha Solteira. 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

KYOWA. **How to form strain gages bridges?**. [S. l: s. n], [20--]. Disponível em: <http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/content/download/3096/96799/file/3.straingage_bridge_eng.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2012.

JANECZKO, C.. **Filtros Digitais**. 2009. Disponível em:
<http://www.pessoal.utfpr.edu.br/janeczko/index_files/pds/capitulo6.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2012.

LANDREIN P.; LORRIOT T.; GUILLAUMAT L. Influence of some test parameters on specimen loading determination methods in instrumented Charpy impact tests. **Engineering Fracture Mechanics**, Kidlington, v. 68, n. 15, p. 1631-1645, 2001.

LORRIOT, T.; MARTIN, E.; QUENISSET, J. M.; RIBIÈRE, J. P. Dynamic analysis of instrumented Charpy impact test using specimen deflection measurement and mass-spring models. **International Journal of Fracture**, Dordrecht, v. 91, n. 4, p. 299-309, 1998.

LORRIOT, T.; MARTIN, E.; QUENISSET, J. M.; SAHRAOUI, S.; LATAILLADE, J. L. A methodological improvement of dynamic fracture toughness evaluations using an instrumented Charpy impact tester. **Journal de Physique IV: Colloque C8**, Supplément au Journal de Physique III, Heidelberg, v. 4, n. C8, p. C8 125-C8 130, 1994.

LUCON, E. Influence of striking edge radius (2 vs. 8 mm) on instrumented Charpy data and absorbed energies. **International Journal of Fracture**. Dordrecht, v. 153, n. 1, p. 1-14, 2008.

MANAHAN, M. P.; STONESIFER, R. B. Studies toward optimum instrumented striker designs. **European Structural Integrity Society**, Kidlington, v. 30, n. 1, p. 151-162, 2002.

MANAHAN, M. P.; STONESIFER, R. B.; SIEWERT, T. A.; MCCOWAN, C. N.; VIGLIOTTI, D. P. Observations on difference between the energy determined using an Instrumented striker and dial/enconder energy. **European Structural Integrity Society**, Kidlington, v. 30, n. 1, p. 229-236, 2002.

MORITA, S.; OTANI, M.; KOBAYASHI, T. Problems related to the measurement of load signal in the Instrumented Charpy impact test. **European Structural Integrity Society**, Kidlington, v. 30, n. 1, p. 213-220, 2002.

NEWLAND, D. E. **Vibraciones aleatorias y análisis espectral**. Madrid: AC, 1983.

PEROSANZ, F. J.; SERRANO, M.; MARTÍNEZ, C; LAPENA, J. Fracture toughness calculation using dynamic testing. **Revista Metalurgia**, Madrid, v. 34, n. 5, p. 399-406, 1998.

PRANDONI, P.; VETTERLI, V. What is digital signal processing. In: _____. **Signal processing for communications**. Switzerland: EPFL, 2008. p. 1-19.

QUINAN, M. A. D. **Análise de ensaio instrumentado de impacto tipo Charpy**. 1996. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.

REED-HILL, R. E. Fratura. In: EVRARD, F. (Tad.) **Princípios de metalurgia física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1982. p. 635-702.

RODRIGUES, A. R. **Determinação da tenacidade à fratura dinâmica de materiais metálicos**. 2001. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Paulista, Ilha Solteira, 2001..

SAHRAOUI, S.; LATAILLADE, J. L. Dynamic effects during instrumented impact testing. **Engineering Fracture Mechanics**, Kidlington, v. 36, n. 65, p. 1013-1019, 1990.

SCHMITT, W.; SUM, D. Z.; BÖHME, W.; NAGEL, G. Evaluation of fracture toughness based on results of instrumented Charpy tests. **International Journal of Vessel and Piping**, v. 59, n. 1-3, p. 21-29, 1994.

SHOCKEY, D. A. Dynamic fracture testing. In: NEWBY, J. R. (Coord.) **ASM handbook: mechanical testing**. 9. ed. Ohio: ASM, 1995. p. 259-261.

SIMÕES, F. C. **Estudo da relação sinal/ruído na aquisição de dados de sensores de alta impedância**. 2008. 101 f. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SOUZA, P. K.; DALL'AGLIO SOBRINHO, M.. **Instrumentos de medida de Sistemas de Instrumentação**. 2005. Disponível em: <<http://www.shs.eesc.usp.br/downloads/instrumentacao/Instrumentos.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2012.

TANGUY, B.; BESSON, J.; PIQUES, R.; PINEAU, A. Numerical modeling of Charpy V-notch tests. **European Structural Integrity Society**, Kidlington, v. 30, n. 1, p. 213-220, 2002.

TOKIMATSU R.C. **Influência de parâmetros microestruturais e procedimentos de ensaio, no comportamento mecânico de um aço de ultra-alta resistência e baixa liga**. 1995. 435 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 1995.

TOKIMATSU, R. C.; FERREIRA, I. Ensaio Charpy: limitações e campos de aplicação. In: Congresso da ABM, 54., 1999, São Paulo **Anais...** São Paulo: ABM, 1999.

TRONSKAR, J. P. ; MANNAN, M. A.; LAI, M. O. Measurement of fracture initiation toughness and crack resistance in instrumented Charpy impact testing. **Engineering Fracture Mechanics**, Kidlington, v. 69, n. 3, p. 321-338, 2002.

TVERGAARD, V.; NEEDLEMAN, A. Weld investigations by 3D analyses of Charpy V-notch specimens, **Engineering Fracture Mechanics**, Kidlington, v. 71, n. 15, p. 2179-2195, 2004.

VENZI, S.; PRIEST, A. H.; MAY, M. J. Influence of inertial load in instrumented impact tests. In: _____ **ASTM STP 466**. Atlantic City: American society for testing materials, 1969. p. 165-180.

VIDOTTO, G. J. **Calibração estática/dinâmica conforme a norma ISO 14.556 para o ensaio Charpy instrumentado**. 2003. 70 f. Relatório (Pesquisa de iniciação científica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

WILLIAMS J. G.; ADAMS, G. C. The analysis of instrumented impact tests using a mass-spring model. **International Journal of Fracture**, v. 33, n. 3, p. 209-222, 1987.

YAMAMOTO, I.; KOBAYASHI, T. Evaluation method of dynamic toughness by computer aided instrumented Charpy impact testing system. *International Journal of Vessel and Piping*, v. 55, n. 2, p. 295-312, 1993.

ANEXO A – Balanço de energia referente ao ensaio Charpy

$$\Delta W = 0 \quad (A1)$$

$$\Delta W = W_i - W_f \rightarrow$$

$$\rightarrow W_i - W_f = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow m \cdot g \cdot h_i = m \cdot g \cdot h_f + E_{fg} + E_p \rightarrow$$

$$\rightarrow W_T + W_p = m \cdot g \cdot h_i - m \cdot g \cdot h_f \rightarrow$$

$$W_T + W_p = m \cdot g \cdot (h_i - h_f) \quad (A2)$$

Onde,

m = massa do martelo;

g = aceleração da gravidade;

h_i = altura inicial do martelo;

h_f = altura final do martelo;

W_i = energia inicial do sistema;

W_f = Energia final do sistema;

W_T = energia global de fratura;

W_p = Energia dissipada (perdas mecânicas, atrito com o ar, entre outras).

ANEXO B – Variação da resistência em função da deformação

Conforme enunciado pela 2ª Lei de Ohm, apresentada na equação B1, a resistência de um elemento está relacionada com sua geometria.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (B1)$$

Para obter uma mudança relativa na resistência é preciso aplicar o logaritmo nos dois lados da equação primeiramente, resultando na equação B2.

$$\begin{aligned} \ln(R) &= \ln\left(\rho \cdot \frac{l}{A}\right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \ln(R) &= \ln(\rho) + \ln(l) + \ln(A) \end{aligned} \quad (B2)$$

Em seguida, derivam-se ambos os lados da igualdade, o que leva a equação B3.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad (B3)$$

Se o extensômetro for de fio a área da seção do condutor será dada pela equação B4. No entanto, se o extensômetro for de lâmina (foil) a área da seção será dada pela equação B5.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (B4)$$

$$A = b \times t \quad (B5)$$

Onde:

A : área da seção [m²];

d : diâmetro [m];

b : largura da seção retangular [m];

t : espessura da lâmina [m].

Se o fio de seção circular e de comprimento inicial l é tracionado e seu diâmetro passa de d para d' , igual ao efeito dado pelo coeficiente de Poisson. Então, tem-se a equação B6.

$$\ln(A) = \ln\left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2\right) \Leftrightarrow \ln(A) = \ln\left(\frac{\pi}{4}\right) + \ln(d^2) \Leftrightarrow$$

$$\therefore \ln(A) = \ln(C) + 2 \cdot \ln(d) \quad (B6)$$

Ao derivar a equação B6 chega-se à equação B7.

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = 2 \cdot \frac{(d' - d)}{d} = -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (B7)$$

Fazendo o mesmo para o extensômetro de seção retangular chega-se à equação B8.

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta t}{t} = -2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (B8)$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson. Substituindo as equações B7 ou B8 na equação B3 obtém-se a equação B9.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \Leftrightarrow \\ \therefore \frac{\Delta R}{R} &= (2 \cdot \nu + 1) \cdot \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{aligned} \quad (B9)$$

Mas $\Delta l/l$ é a deformação, dada por ε . Logo, a equação B8 pode ser reescrita na forma apresentada pela equação B10, na qual os dois lados da equação foram divididos por $\varepsilon = \Delta l/l$.

$$\left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \right) = (2 \cdot \nu + 1) + \left(\frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \right) \quad (\text{B10})$$

A mudança na resistividade, ρ , é proporcional à mudança volumétrica do material, conforme descrito pela equação B11.

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = m \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{B11})$$

Onde:

ρ : resistividade [$\Omega \cdot m$];

V : volume [m^3];

m : constante de proporcionalidade [Ω/m^2].

Mas, a variação no volume pode ser dada na forma descrita pela equação B12.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V}{V} &= \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta l}{l} + \left(-2 \cdot \nu \cdot \frac{\Delta l}{l} \right) = (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \frac{\Delta l}{l} \Leftrightarrow \\ \therefore \frac{\Delta V}{V} &= (1 - 2 \cdot \nu) \cdot \varepsilon \end{aligned} \quad (\text{B12})$$

Ao substituir a equação B12 na equação B11 e em seguida na equação B10 chega-se à equação B13.

$$\left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \right) = (2 \cdot \nu + 1) + [m \cdot (1 - 2 \cdot \nu)] \Leftrightarrow$$

$$\therefore \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \right) = (1 + m) + 2 \cdot \nu \cdot (1 - m) \quad (\text{B13})$$

A constante de proporcionalidade pode ser determinada experimentalmente, no entanto os extensômetros geralmente são construídos com uma liga de cobre e níquel e é sabido que **m** neste caso se aproxima da unidade. Dessa forma a equação B13 pode ser reescrita na forma apresentada pela equação B14.

$$\therefore \left(\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \right) \cong 2 \quad (\text{B14})$$

O valor apresentado na equação B14 é chamado de sensibilidade à deformação do material metálico, que geralmente é expresso por **K**. Uma vez que K é determinado em função do material resistivo utilizado na construção do extensômetro pode-se reescrever a equação B14 na forma apresentada na equação B15.

$$\therefore \left(\frac{\Delta R}{R} \right) = K \cdot \varepsilon \quad (\text{B15})$$

Esta dedução foi extraída da apostila de Extensometria Básica do NEPAE, Andolfato (2004, p.1-30).

ANEXO C – Tensão de saída de uma ponte retificadora em função da deformação

Partindo da equação C1, que relaciona tensão na entrada e na saída da ponte de extensômetros e partindo da suposição que cada extensômetro possua certo desvio em relação ao seu valor comercial R , algo que acontece na prática, conforme descrito no sistema em C2.

$$e = \left[\frac{(R_3 \cdot R_2) - (R_1 \cdot R_4)}{(R_1 \cdot R_3) + (R_2 \cdot R_3) + (R_1 \cdot R_4) + (R_2 \cdot R_4)} \right] \cdot E \quad (C1)$$

$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_1 \\ R_2 &= R + \Delta R_2 \\ R_3 &= R + \Delta R_3 \\ R_4 &= R + \Delta R_4 \end{aligned} \quad (C2)$$

Então, reescrevendo a equação C1 considerando o desvio apontado por C2 tem-se C3:

$$e = \left\{ \frac{[(R + \Delta R_3) \cdot (R + \Delta R_2)] - [(R + \Delta R_1) \cdot (R + \Delta R_4)]}{[(R + \Delta R_1) \cdot (R + \Delta R_3)] + [(R + \Delta R_2) \cdot (R + \Delta R_3)] + [(R + \Delta R_1) \cdot (R + \Delta R_4)] + [(R + \Delta R_2) \cdot (R + \Delta R_4)]} \right\} \cdot E \quad (C3)$$

Realizando a distributiva e, em seguida, dividindo numerador e denominador por R^2 obtém-se a equação C4.

$$e = \left[\frac{-\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} + \frac{(\Delta R_2 \cdot \Delta R_3)}{R^2} - \frac{(\Delta R_1 \cdot \Delta R_4)}{R^2}}{4 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right) + \frac{(\Delta R_1 \cdot \Delta R_3)}{R^2} + \frac{(\Delta R_2 \cdot \Delta R_3)}{R^2} + \frac{(\Delta R_1 \cdot \Delta R_4)}{R^2} + \frac{(\Delta R_2 \cdot \Delta R_4)}{R^2}} \right] \cdot E \quad (C4)$$

Sabe-se que $R^2 \gg \Delta R_n$ e que $R^2 \gg (\Delta R_n \cdot \Delta R_m)$, logo o resultado dos termos $\Delta R_n/R^2$ e $(\Delta R_n \cdot \Delta R_m)/R^2$ são desprezíveis, esta simplificação conduz à equação C5.

$$e = \left[\frac{-\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R}}{4 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} + \frac{\Delta R_4}{R} \right)} \right] \cdot E \quad (C5)$$

Retomando a equação apresentada na equação 6, que foi deduzida no Apêndice B deste estudo, que afirma que a variação na resistência é diretamente proporcional à deformação, ao fazer as devidas substituições tem-se a equação C6.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$$

$$e = \left[\frac{-K \cdot \varepsilon_1 + K \cdot \varepsilon_2 + K \cdot \varepsilon_3 - K \cdot \varepsilon_4}{4 + 2 \cdot (K \cdot \varepsilon_1 + K \cdot \varepsilon_2 + K \cdot \varepsilon_3 + K \cdot \varepsilon_4)} \right] \cdot E \quad (C6)$$

Colocando K e (1/4) em evidência tem-se a equação C7.

$$e = \left[\frac{K \cdot (-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)}{4 + 2 \cdot K \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)} \right] \cdot E \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \left[\frac{K \cdot (-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)}{4 + 4 \cdot K \cdot \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2} \right)} \right] \cdot E \Leftrightarrow$$

$$\therefore e = \frac{K \cdot E}{4} \cdot \left[\frac{-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4}{1 + \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2} \right)} \right]$$

(C7)

Porém, ao considerar que ε se trata de um valor pequeno, então é possível impor que:

$$1 + \left(\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{2} \right) \cong 1$$

Ao fazer essa consideração a equação C7 pode ser reescrita na forma apresentada na equação C8.

$$\therefore e = \frac{K \cdot E}{4} \cdot (-\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (C8)$$

Esta dedução foi extraída da apostila de Extensometria Básica do NEPAE, Andolfato et al. (2004).

ANEXO D – Possíveis montagens e aplicações de pontes de extensômetros

Tabela 11 - Montagem e explicações de circuitos em ponte com extensômetros.

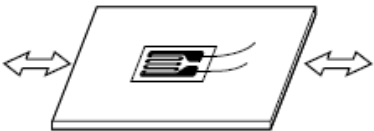
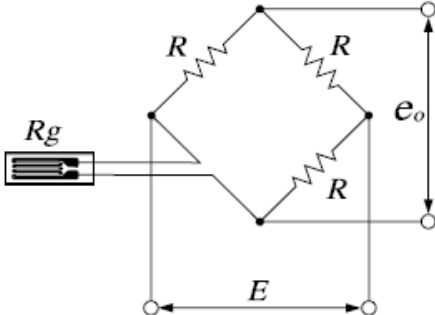
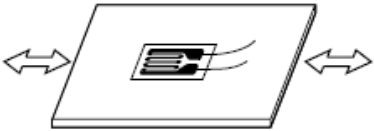
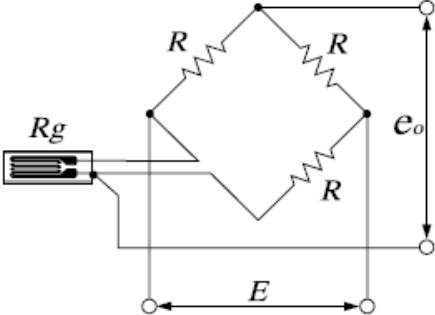
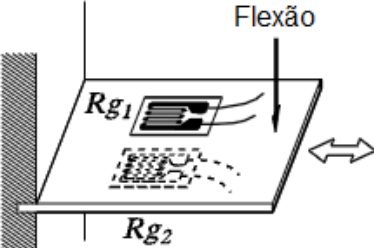
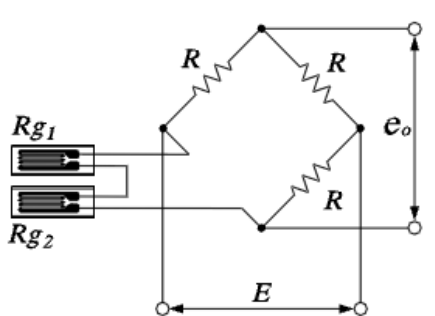
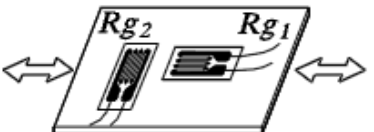
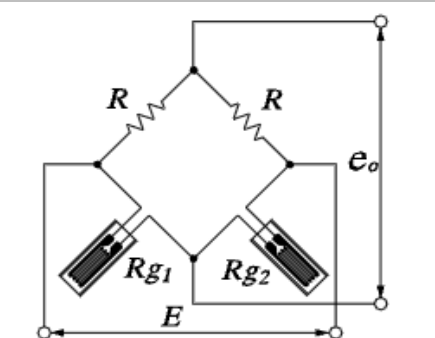
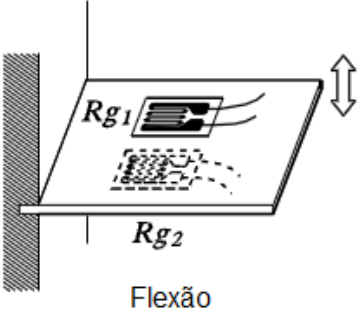
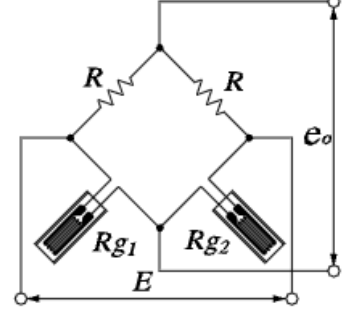
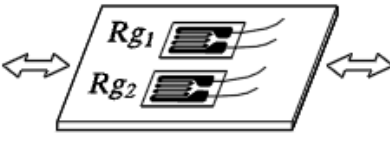
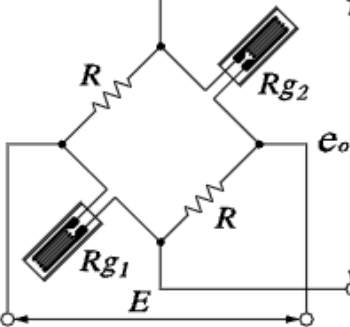
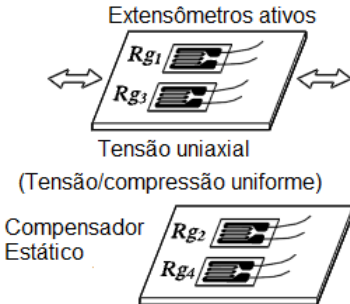
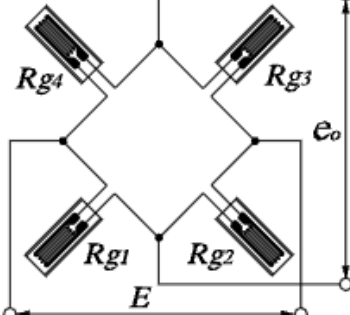
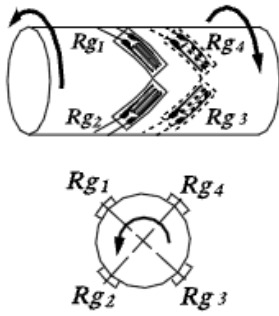
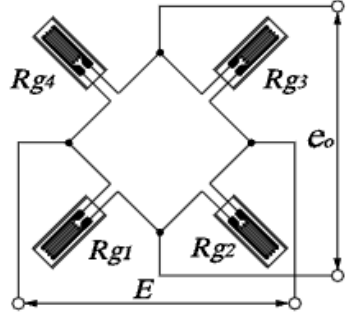
Exemplo de aplicação	Circuito	Saída
 Tensão uniaxial (Tensão/compressão uniforme)		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ K_s: Gage factor ϵ_o: deformação E: Tensão da ponte (entrada) e_o: Tensão de saída R_g: Resistência do Extensômetro R: Resistência fixa
 Tensão uniaxial (Tensão/compressão uniforme)		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$
 Flexão R_{g1} R_{g2} Tensão uniaxial (Tensão/compressão uniforme)		$e_o = \frac{E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ $R_{g1} \dots$ Deformação: ϵ_1 $R_{g2} \dots$ Deformação: ϵ_2 $\epsilon_o = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2}$ R: Resistência fixa $R = R_{g1} + R_{g2}$
 Tensão uniaxial (Tensão/compressão uniforme)		$e_o = \frac{(1 + \nu) E}{4} K_s \cdot \epsilon_o$ ν: Coef. de Poisson R_{g1}, R_{g2}: Resistência do Extensômetro $R_{g1} \dots$ Deformação: ϵ_o $R_{g2} \dots$ Deformação: $-\nu \epsilon_o$ R: Resistência fixa

Tabela 11 - Montagem e explicações de circuitos em ponte com extensômetros
(continuação).

 Flexão		$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ Rg_1 ... Deformação: ϵ_o Rg_2 ... Deformação: $-\epsilon_o$ R: Resistência fixa
 Tensão uniaxial (Tensão/compressão uniforme)		$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ Rg_1 ... Deformação: ϵ_o Rg_2 ... Deformação: ϵ_o R: Resistência fixa
 Extensômetros ativos Tensão uniaxial (Tensão/compressão uniforme) Compensador Estático		$e_o = \frac{E}{2} K_s \cdot \epsilon_o$ Rg_1, Rg_3 Deformação: ϵ_o Rg_2, Rg_4 Deformação: 0
		$e_o = K_s \cdot \epsilon_o \cdot E$ Rg_1, Rg_3 Deformação por flexão: ϵ_o Rg_2, Rg_4 Deformação por flexão: $-\epsilon_o$

ANEXO E – Procedimento para colagem de extensômetros

O processo de colagem de extensômetros necessita de uma superfície devidamente preparada, já que não pode haver bolhas de ar sob o extensômetros, pois isto leva a erros grosseiros durante o processo de medição.

O procedimento usado para colar extensômetros:

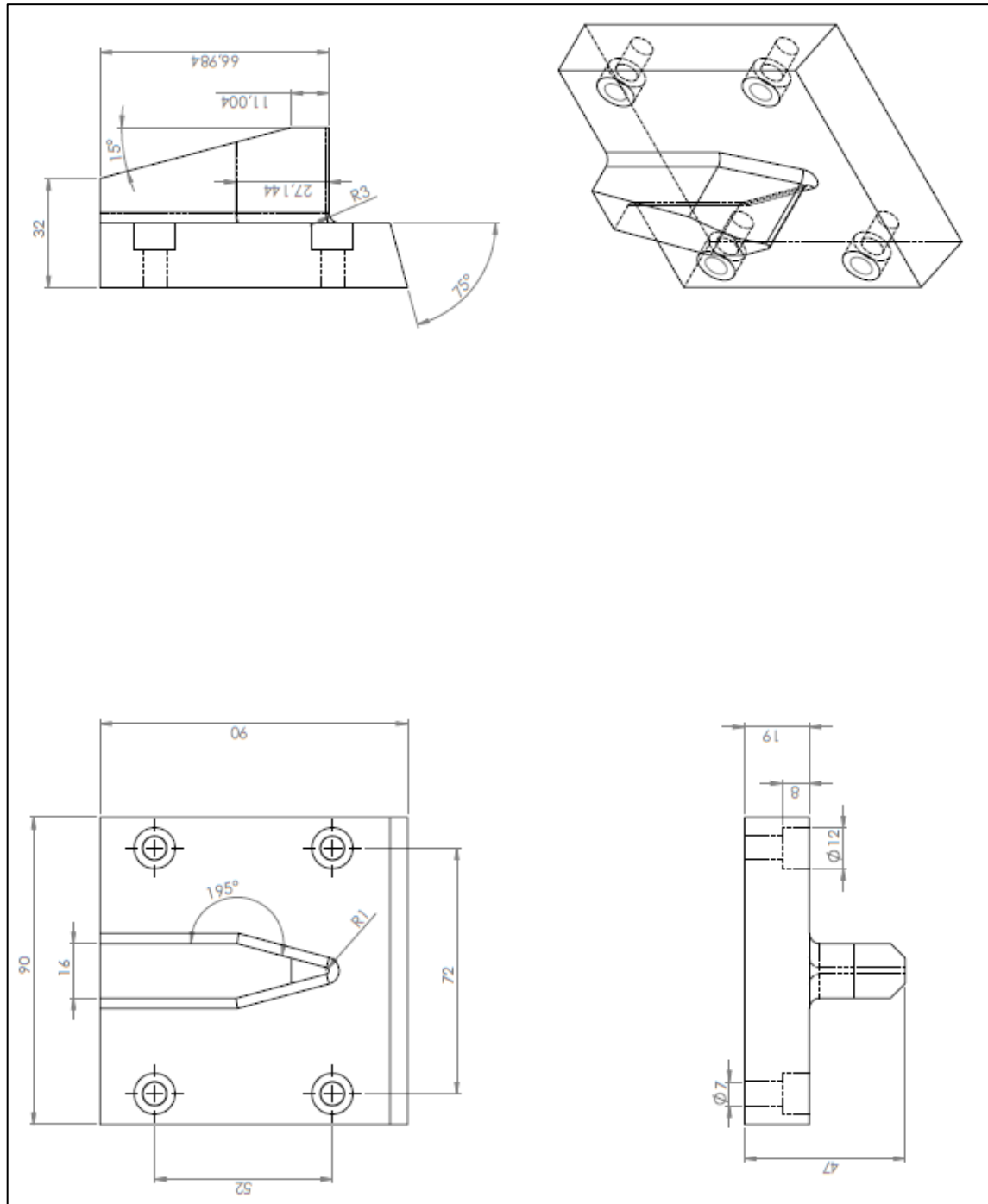
- a) prepara-se a superfície empregando lixas d'água com *Grana 220* em um sentido e depois o mesmo no sentido perpendicular ao primeiro para criar uma rugosidade apropriada;
- b) são feitas as linhas de referência para auxiliar no posicionamento do extensômetro;
- c) é usada uma gaze seca para remover qualquer partícula ou impureza existente na superfície após o lixamento;
- d) a superfície da peça que recebeu os extensômetros foi limpa com álcool isopropílico;
- e) aplicou-se M-Prep Conditioner A (Condicionador) na superfície com uma gaze, seguindo um único sentido, indo do centro para a periferia, em seguida deve-se iniciar a limpeza em outro sentido com uma nova gaze seguindo o mesmo movimento;
- f) a neutralização da superfície foi efetuada utilizando-se o *M-Prep Neutralizer 5A* (Neutralizador), também aplicado com uma gaze ou algodão;
- g) após a realização deste procedimento a colagem do extensômetro foi iniciada em 45 minutos;
- h) o extensômetro foi posicionado utilizando uma pinça e um pedaço de fita adesiva (*M-LINE PCT-2A*);
- i) após posicioná-lo corretamente, a fita foi levantada com cuidado, aplicou-se o adesivo (KBR-610) no extensômetro e a fita foi presa novamente na superfície;
- j) então, colocou-se uma manta de Teflon® e silicone sobre o local que recebeu a colagem e aplicou-se uma pressão (1 a 5 kg/mm²) com grampos sobre a superfície;
- k) o conjunto deve permanecer por 1 hora para cura da cola em uma estufa;
- l) após 1 hora removeram-se os grampos, a placa de silicone e o Teflon®;

- m) a peça que recebeu a colagem dos extensômetros foi levada novamente para a estufa por mais 1 hora a fim de aliviar as tensões residuais;
- n) após 1 hora, a peça foi retirada da estufa e resfriou à temperatura ambiente;
- o) soldaram-se os terminais dos extensômetros aos terminais dos cabos com blindagem.

APÊNDICE A – Cutelos utilizados neste estudo

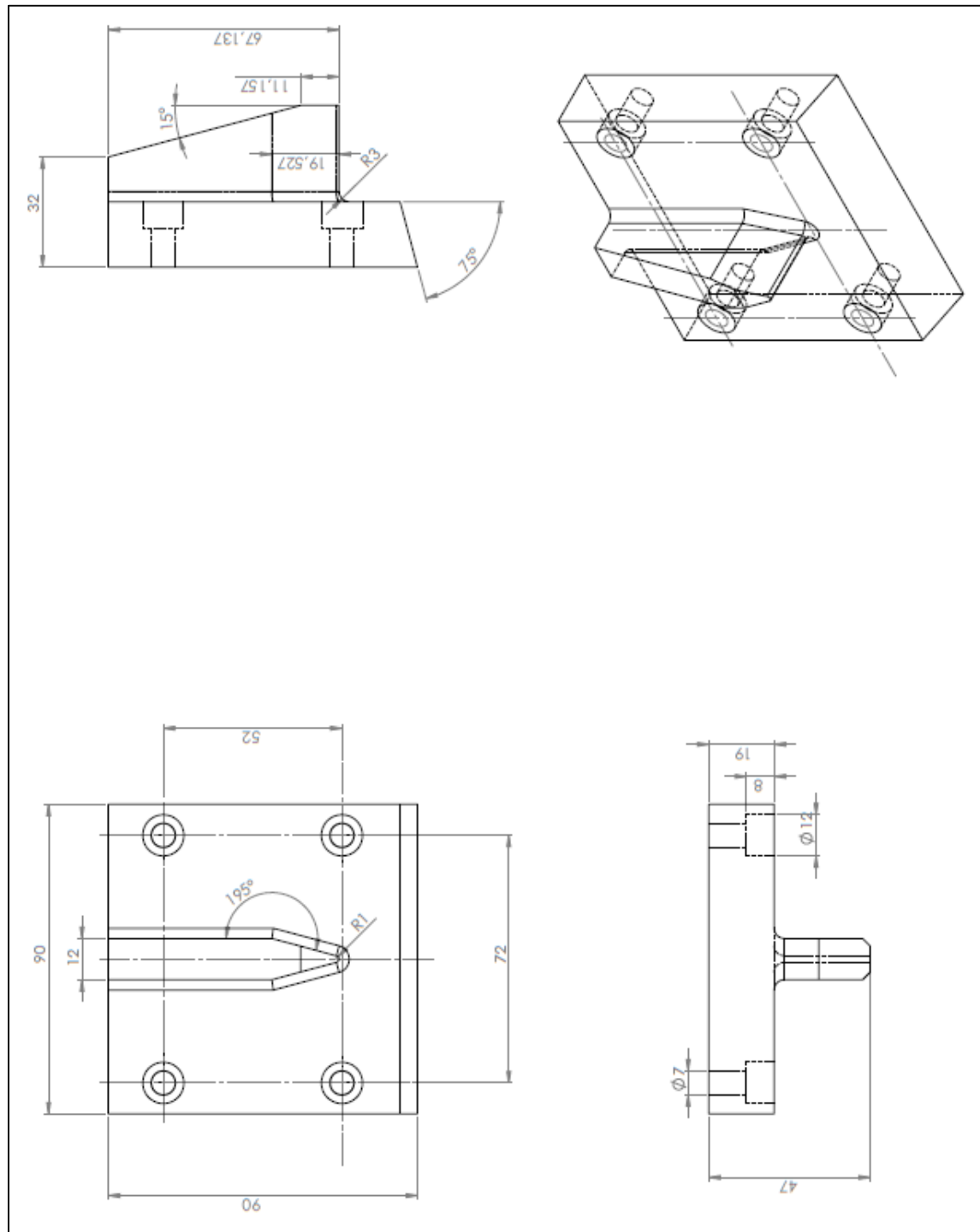
As figuras 107 a 110 apresentam os diferentes tipos de layouts de cutelos utilizados neste estudo.

Figura 107 - Cutelo de rigidez intermediária (padrão).



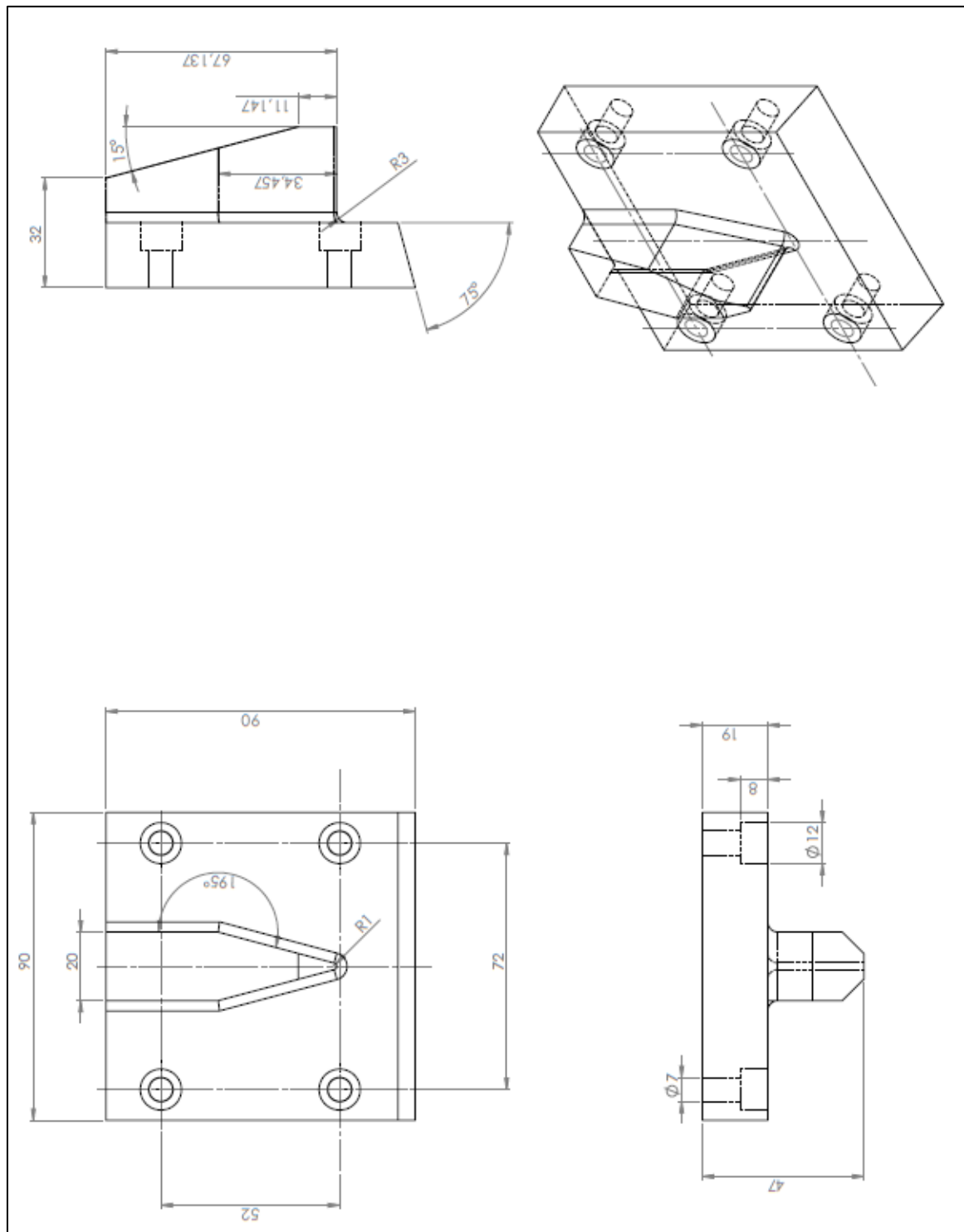
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 108 - Cutelo de menor rigidez.



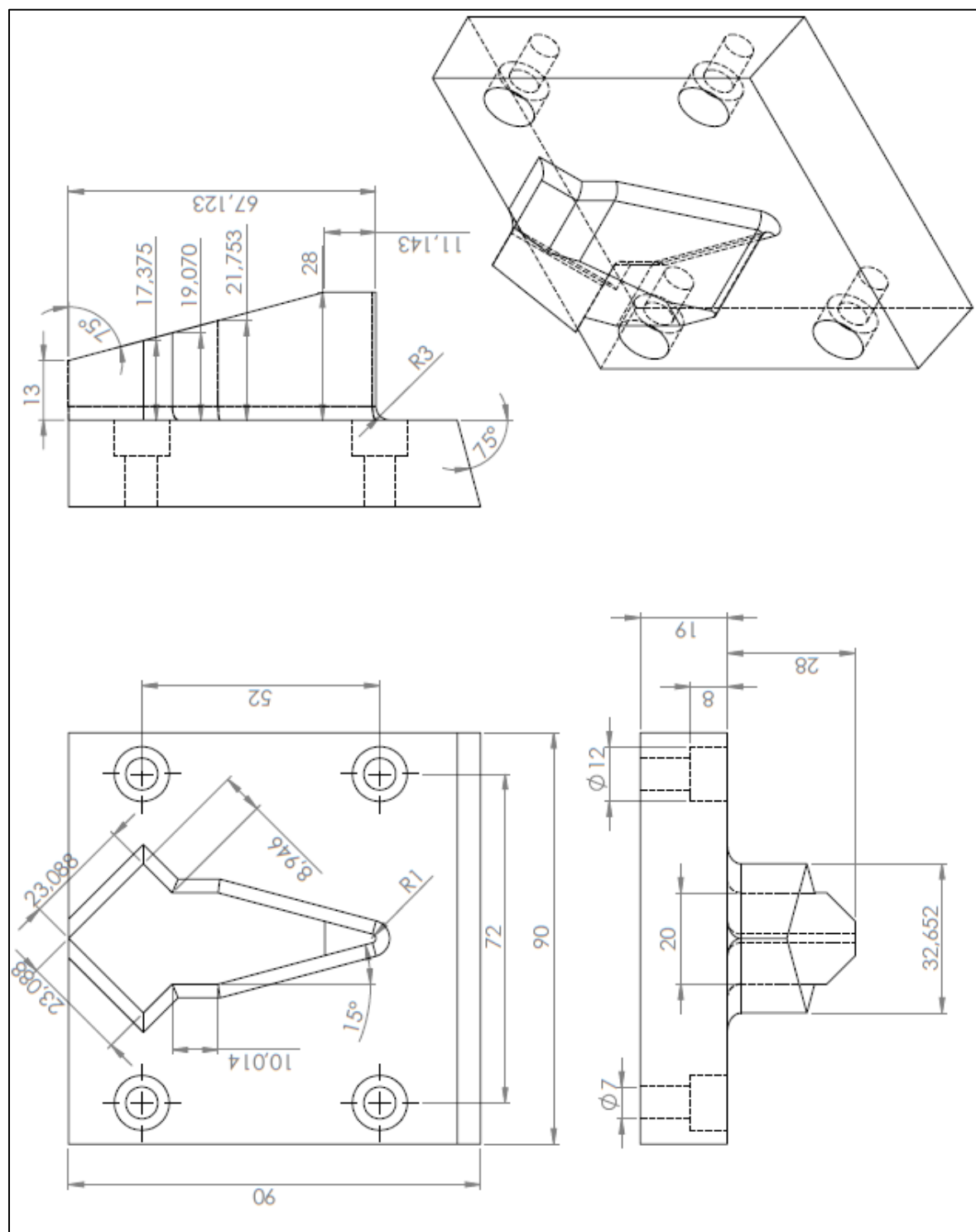
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 109 - Cutelo de maior rigidez.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 110 - Cutelo GC3M – II.



Fonte: Elaboração do autor.

APÊNDICE B – Rotina computacional

Rotina utilizada para o tratamento de dados obtidos no ensaio instrumentado.

Programa principal:

```
% =====
% #PROGRAMA: Charpy Instrumentado
% =====
%
% *****
% Inicialização
% *****
%
close all;
warning off;
format long;
clear all;
clc;
%
% *****
% Entrada de dados
% *****
%
M = menu('ENTRADA DE DADOS :',' Martelo ',' Corpo de prova ',' Ambos ');
%
tic
%
A = load('D:\<endereço do arquivo>\...\tempo.txt');
A = A';
if (M==1)||(M==3)
    B = load('D:\<endereço do arquivo>\...\martelo.txt');
    B = B';
    Bzero = B;
```

```

LB = length(B);
%
if LB<1024
    %
    Bzero(LB+1:1024) = 0;
    %
elseif (LB>1024)&&(LB<2048)
    %
    Bzero(LB+1:2048) = 0;
    %
elseif (LB>2048)&&(LB<4096)
    %
    Bzero(LB+1:4096) = 0;
    %
end
%
end
if (M==2)|| (M==3)
    C = load('D:\<endereço do arquivo>\...\corpo.txt');
    C = C';
    Czero = C;
    LC = length(C);
    %
    if LC<1024
        %
        Czero(LC+1:1024) = 0;
        %
    elseif (LC>1024)&&(LC<2048)
        %
        Czero(LC+1:2048) = 0;
        %
    elseif (LC>2048)&&(LC<4096)
        %
        Czero(LC+1:4096) = 0;
    end
end

```

```

        %
    end
    %
end
%
% Deseja calcular tenacidade à fratura dinâmica?
%
tnf = menu('Calcular tenacidade à fratura dinâmica ?', ' NÃO ', ' SIM');
%
if tnf==1
    %
    % Metodologia adotada
    %
    opcao = menu('Escolha uma metodologia:', ' Tenacidade à Fratura Linear Elástica
(Materiais Frágeis) ', ' Tenacidade à Fratura Elasto-Plástica (Materiais Dúcteis) ');
    %
    % Foram empregados corpos-de-prova pré-trincados?
    %
    cp = menu('Corpo de prova pré-trincado ?',' NÃO  ', ' SIM  ');
    %
end
%
% *****
% Entrada de Dados
% *****
%
if (tnf==1)
    %
    if (cp==1)
        %
        if (M==1)
            %
            perguntas={'Fator de calibração do cutelo instrumentado',...
                'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)',...

```

```

    'Largura do corpo-de-prova [mm]',...
    'Espessura do corpo-de-prova [mm]',...
    'Distância entre os apoios da máquina [mm]';
%
padrao={'3680.22','55','10','10','40'};
titulo='Entrada de Dados';
entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
dados=str2num(char(entradas));
%
FCB = dados(1);
N = dados(2);
soel = (dados(3))*(1E-3);
larg = (dados(4))*(1E-3);
space = (dados(5))*(1E-3);
%
if (opcao==2)
    %
    modulo=menu('Selecione o tipo de material analisado')
    %
end
%
elseif (M==2)
    %
    perguntas={'Fator de calibração do corpo de prova instrumentado',...
        'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)',...
        'Largura do corpo de prova [mm]',...
        'Espessura do corpo de prova [mm]',...
        'Distância entre os apoios da máquina [mm]'};
    %
    padrao={'3665','55','10','10','40'};
    titulo='Entrada de Dados';
    entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
    dados=str2num(char(entradas));
    %

```

```

FCC = dados(1);
N = dados(2);
soel = (dados(3))*(1E-3);
larg = (dados(4))*(1E-3);
space = (dados(5))*(1E-3);
%
if (opcao==2)
    %
    modulo=menu('Selecione o tipo de material analisado')
    %
end
%
elseif (M==3)
    %
    perguntas={'Fator de calibração do cutelo instrumentado',...
        'Fator de calibração do corpo de prova instrumentado',...
        'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)',...
        'Largura do corpo de prova [mm]',...
        'Espessura do corpo de prova [mm]',...
        'Distância entre os apoios da máquina [mm]'};
    %
    padrao={'8000','19750','55','10','10','40'};
    titulo='Entrada de Dados';
    entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
    dados=str2num(char(entradas));
    %
    FCB = dados(1);
    FCC = dados(2);
    N = dados(3);
    soel = (dados(4))*(1E-3);
    larg = (dados(5))*(1E-3);
    space = (dados(6))*(1E-3);
    %
    if (opcao==2)

```

```
%
modulo=menu('Selecione o tipo de material analisado')
%
end
%
end
%
crack = 2*(1E-3);
%
elseif (cp==2)
%
if (M==1)
%
perguntas={'Fator de calibração do cutelo instrumentado',...
'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)',...
'Largura do corpo-de-prova [mm]',...
'Espessura do corpo-de-prova [mm]',...
'Distância entre os apoios da máquina [mm]',...
'Comprimento da pré-trinca [mm]'};
%
padrao={'3680.22','55','10','10','40','0.1'};
titulo='Entrada de Dados';
entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
dados=str2num(char(entradas));
%
FCB = dados(1);
N = dados(2);
soel = (dados(3))*(1E-3);
larg = (dados(4))*(1E-3);
space = (dados(5))*(1E-3);
crack = (2*(1E-3)) + (dados(6))*(1E-3);
%
if (opcao==2)
%
```

```

    modulo=menu('Selecione o tipo de material analisado')
    %
end
%
elseif (M==2)
    %
    perguntas={'Fator de calibração do corpo de prova instrumentado',...
        'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)',...
        'Largura do corpo de prova [mm]',...
        'Espessura do corpo de prova [mm]',...
        'Distância entre os apoios da máquina [mm]',...
        'Comprimento da pré-trinca [mm]'};
    %
    padrao={'3665','55','10','10','40','0.1'};
    titulo='Entrada de Dados';
    entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
    dados=str2num(char(entradas));
    %
    FCC = dados(1);
    N = dados(2);
    soel = (dados(3))*(1E-3);
    larg = (dados(4))*(1E-3);
    space = (dados(5))*(1E-3);
    crack = (2*(1E-3)) + (dados(6))*(1E-3);
    %
    if (opcao==2)
        %
        modulo=menu('Selecione o tipo de material analisado')
        %
    end
    %
elseif (M==3)
    %
    perguntas={'Fator de calibração do cutelo instrumentado',...

```

```
'Fator de calibração do corpo de prova instrumentado',...
'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)',...
'Largura do corpo de prova [mm]',...
'Espessura do corpo de prova [mm]',...
'Distância entre os apoios da máquina [mm]',...
'Comprimento da pré-trinca [mm]';

%
padrao={'3680.22','3665','55','10','10','40','0.1'};
titulo='Entrada de Dados';
entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
dados=str2num(char(entradas));

%
FCB = dados(1);
FCC = dados(2);
N = dados(3);
soel = (dados(4))*(1E-3);
larg = (dados(5))*(1E-3);
space = (dados(6))*(1E-3);
crack = (2*(1E-3)) + (dados(7))*(1E-3);

%
if (opcao==2)
    %
    modulo=menu('Selecione o tipo de material analisado')
    %
end
%
end
%
end
%
elseif (tnf==2)
    %
    if (M==1)
        %
```

```

perguntas={'Fator de calibração do cutelo instrumentado',...
    'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)'};
padrao={'3680.22','55'};
titulo='Entrada de dados';
entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
dados=str2num(char(entradas));
%
FCB = dados(1);
N = dados(2);
%
elseif (M==2)
    %
    perguntas={'Fator de calibração do corpo de prova instrumentado',...
        'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)'};
    padrao={'3665','55'};
    titulo='Entrada de dados';
    entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
    dados=str2num(char(entradas));
    %
    FCB = dados(1);
    N = dados(2);
    %
elseif (M==3)
    %
    perguntas={'Fator de calibração do cutelo instrumentado',...
        'Fator de calibração do corpo de prova instrumentado',...
        'Número de pontos usados no cálculo da média móvel (ímpar)'};
    padrao={'3665','55'};
    titulo='Entrada de dados';
    entradas=inputdlg(perguntas,titulo,1,padrao);
    dados=str2num(char(entradas));
    %
    FCB = dados(1);
    FCC = dados(2);

```

```

    N = dados(3);
    %
end
%
end
%
% *****
% Fator de calibração
% *****
%
if (M==1)||(M==3)
    B = B*FCB*9.81;
    offB = 0;
end
%
if (M==2)||(M==3)
    C = C*FCC*9.81;
    offC = 0;
end
%
% *****
% Correção de Offset
% *****
%
if (M==1)||(M==3)
    %
    sair = 1;
    valorB = 0;
    while sair<=50
        valorB = valorB + B(sair);
        sair = sair+1;
    end
    valorB = valorB/50;
    offB = offB - valorB;

```

```
%
LB = length(B);
cont = 1;
while cont<=LB
    B(cont) = B(cont) + (offB);
    cont = cont+1;
end
%
Bzero(1:LB) = B(1:LB);
%
end
%
if (M==2)||(M==3)
    %
    sair = 1;
    valorC = 0;
    while sair<=500
        valorC = valorC + C(sair);
        sair = sair+1;
    end
    valorC = valorC/500;
    offC = offC - valorC;
    %
    LC = length(C);
    cont = 1;
    while cont<=LC
        C(cont) = C(cont) + (offC);
        cont = cont+1;
    end
    %
end
%
% *****
% Variáveis no cálculo da FFT
```

```
% *****

%

fs = 1/A(2);
Dt = 1/fs;
t = 0:Dt:1;

%

% *****

% Janelamento

% *****

%

if (M==1)||(M==3)
    janelaB = hanning(length(Bzero));
    Bj = Bzero.*janelaB';
end

if (M==2)||(M==3)
    janelaC = hanning(length(Czero));
    Cj = Czero.*janelaC';
end

%

% *****

% Estimação do deslocamento

% *****

%

if (M==1)||(M==3)
    %
    [KB,valorB,deslocB,speedB] = deslocamento(N,B,A,LB);
    %
end

%

if (M==2)||(M==3)
    %
    [KC,valorC,deslocC,speedC] = deslocamento(N,C,A,LC);
    %
end

end
```

```
%
% *****
% Média móvel
% *****
%
% # Martelo
%
if (M==1)||(M==3)
    %
    [mmB,displaB] = media(B,LB,KB,N,deslocB);
    %
end
%
% # Corpo-de-prova
%
if (M==2)||(M==3)
    %
    [mmC,displaC] = media(C,LC,KC,N,deslocC);
    %
end
%
% *****
% Janelamento após média-móvel
% *****
%
if (M==1)||(M==3)
    %
    mmBzero = mmB;
    mmBzero(LB+1:length(Bzero)) = 0;
    mmBj = mmBzero.*janelaB';
    %
end
%
if (M==2)||(M==3)
```

```
%
mmCzero = mmC;
mmCzero(LC+1:length(Czero)) = 0;
mmCj = mmCzero.*janelaC';
%
end
%
% *****
% Cálculo da Energia
% [Método 1/3 de Simpsom]
% *****
%
% # Martelo
%
if (M==1)||(M==3)
    %
    martelo = integral(B,LB,deslocB);
    %
end
%
% # Corpo-de-prova
%
if (M==2)||(M==3)
    %
    corpo = integral(C,LC,deslocC);
    %
end
%
% *****
% Cálculo da energia após média-móvel
% [método 1/3 de Simpsom]
% *****
%
% # Martelo
```

```
%
if (M==1)||(M==3)
    %
    Mmart = integral(mmB,LB,displaB);
    %
    [t,y] = max(Mmart);
    Mmart(y+1:end)=t;
    %
end
%
% # Corpo-de-prova
%
if (M==2)||(M==3)
    %
    Mcorp = integral(mmC,LC,displaC);
    %
    [t,y] = max(Mcorp);
    Mcorp(y+1:end)=t;
    %
end
%
% *****
% Estimação da nucleação da trinca
% *****
%
if tnf==1
    %
    if opcao==1
        %
        if (M==1)||(M==3)
            %
            [KIdB,wholeB,ledB]=mfle(deslocB,mmB,LB,crack,soel,larg,space);
            %
        end
    end
end
```

```
%
if (M==2)||(M==3)
    %
    [KIdC,wholeC,ledC]=mfle(deslocC,mmC,LC,crack,soel,larg,space);
    %
end
%
end
%
end
%
% *****
% Plotando curvas
% *****
%
if (M==1)
    %
    [lixo] = grafico1(A,displaB,deslocB,B,mmB,Mmart,martelo,LB,M,Bj,mmBj,fs);
    %
end
%
if (M==2)
    %
    [lixo] = grafico1(A,displaC,deslocC,C,mmC,Mcorp,corpo,LC,M,Cj,mmCj,fs);
    %
end
%
if (M==3)
    %
    [lixo] =
grafico2(A,displaB,displaC,deslocB,deslocC,B,C,mmB,mmC,Mmart,Mcorp,martelo,co
rpo,LB,Bj,mmBj,Cj,mmCj,fs);
    %
end
```

```
%
clc;
%
% *****
% Resultados
% *****
%
fprintf('\n\t***** Resultados
*****');
%
% # Martelo
%
if (M==1)||(M==3)
    %
    fprintf('\n\n\t\t# Cutelo instrumentado');
    %
    fprintf('\n\n\t\t>> Energia Global de Fratura = %10.3f J',max(Mmart));
    %
    fprintf('\n\n\t\t>> Força Máxima = %10.3f
    kN',max(mmB)/1000);
    %
    if (tnf==1)
        %
        if (opcao==1)
            %
            if cp==1
                %
                fprintf('\n\n\t\t>> Energia necessária para iniciar a trinca = %10.3f
                J',Mmart(wholeB));
                %
                fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade a fratura linear elástica dinâmica = %10.3f
                MPa.m^(1/2)',KIdB);
                %
                fprintf('\n\n\t\t(*) aparente');
```

```

%
fprintf('\n\n\t\t>> Força no limite de escoamento dinâmico      = %10.3f
kN',mmB(ledB)/1000);
%
fprintf('\n\n\t\t>> Energia no limite de escoamento dinâmico      = %10.3f
J',Mmart(ledB));
%
elseif cp==2
%
fprintf('\n\n\t\t>> Energia necessária para iniciar a trinca      = %10.3f
J',Mmart(wholeB));
%
fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade a fratura linear elástica dinâmica* = %10.3f
MPa.m^(1/2)',KldB);
%
fprintf('\n\n\t\t>> Força no limite de escoamento dinâmico      = %10.3f
kN',mmB(ledB)/1000);
%
fprintf('\n\n\t\t>> Energia no limite de escoamento dinâmico      = %10.3f
J',Mmart(ledB));
%
end
%
end
%
if (opcao==2)
%
if cp==1
%
fprintf('\n\n\t\t>> Força Elástica                                = %10.3f
kN',mmB(wholeB)/1000);
%
fprintf('\n\n\t\t>> Energia absorvida até o início da trinca      = %10.3f
J',Mmart(wholeB));

```

```
%
    fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica (KJd) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',KJdB);
%
    fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica (Jld) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',JldB);
%
elseif cp==2
    %
    fprintf('\n\n\t\t>> Força Elástica                        = %10.3f
kN',mmB(wholeB)/1000);
%
    fprintf('\n\n\t\t>> Energia absorvida até o início da trinca          = %10.3f
J',Mmart(wholeB));
%
    fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica* (KJd) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',KJdB);
%
    fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica* (Jld) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',JldB);
%
    fprintf('\n\n\t\t(*) aparente');
%
end
%
end
%
end
%
end
%
if (M==2)||(M==3)
```

```
%
if (M==2)
    %
    fprintf('\n\n\t\t# Corpo de prova instrumentado');
    %
elseif (M==3)
    %
    fprintf('\n\n\n\t\t# Corpo de prova instrumentado');
    %
end
%
fprintf('\n\n\t\t>> Energia Global de Fratura                = %10.3f J',max(Mcorp));
%
fprintf('\n\n\t\t>> Força Máxima                                = %10.3f
kN',max(mmC)/1000);
%
if (tnf==1)
    %
    if (opcao==1)
        %
        if cp==1
            %
            fprintf('\n\n\t\t>> Energia necessária para iniciar a trinca        = %10.3f
J',Mcorp(wholeC));
            %
            fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade a fratura linear elástica dinâmica  = %10.3f
MPa.m^(1/2)',KIdC);
            %
            fprintf('\n\n\t\t(*) aparente');
            %
            fprintf('\n\n\t\t>> Força no limite de escoamento dinâmico        = %10.3f
kN',mmC(ledC)/1000);
            %
```

```

    fprintf('\n\n\t\t>> Energia no limite de escoamento dinâmico      = %10.3f
J',Mcorp(ledC));
    %
elseif cp==2
    %
    fprintf('\n\n\t\t>> Energia necessária para iniciar a trinca      = %10.3f
J',Mcorp(wholeC));
    %
    fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade a fratura linear elástica dinâmica* = %10.3f
MPa.m^(1/2)',KldC);
    %
    fprintf('\n\n\t\t>> Força no limite de escoamento dinâmico      = %10.3f
kN',mmC(ledC)/1000);
    %
    fprintf('\n\n\t\t>> Energia no limite de escoamento dinâmico      = %10.3f
J',Mcorp(ledC));
    %
end
%
end
%
if (opcao==2)
    %
    if cp==1
        %
        fprintf('\n\n\t\t>> Força Elástica                          = %10.3f
kN',mmC(wholeC)/1000);
        %
        fprintf('\n\n\t\t>> Energia absorvida até o início da trinca      = %10.3f
J',Mcorp(wholeC));
        %
        fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica (KJd) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',KJdC);
        %

```

```

fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica (JId) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',JIdC);
%
elseif cp==2
%
fprintf('\n\n\t\t>> Força Elástica                                = %10.3f
kN',mmC(wholeC)/1000);
%
fprintf('\n\n\t\t>> Energia absorvida até o início da trinca          = %10.3f
J',Mcorp(wholeC));
%
fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica* (KJd) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',KJdC);
%
fprintf('\n\n\t\t>> Tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica* (JId) =
%10.3f MPa.m^(1/2)',JIdC);
%
fprintf('\n\n\t\t(*) aparente');
%
end
%
end
%
end
%
fprintf('\n\n\t***** Fim do Programa
*****\n');
%
disp(' ');
if (M==1)||(M==3)
    if (M==3)
        disp(' ');
    end
end

```

```

end
%
% # Salvando vetores com dados do martelo
%
save deslocaB -ascii
save mmB -ascii
save Mmart -ascii
%
end
if (M==2)||(M==3)
%
% # Salvando vetores com dados do corpo-de-prova
%
save deslocaC -ascii
save mmC -ascii
save Mcorp -ascii
%
end
%
toc
disp(' ');
%
% *****
% ***** Fim do Programa *****
% *****

```

Subrotina *deslocamento*:

```

% *****
% ***** Início da Subrotina Deslocamento *****
% *****
%
function [K,valor,desloc,speed] = displacement(NN,F,T,L)
%

```

```
K = (NN-1)/2;
valor = 0;
desloc(1) = 0;
speed(1) = 5.49;
%
sair = 2;
while sair<=L
    %
    valor = valor + (F(sair)*(T(sair)-T(sair-1)));
    speed(sair) = 5.49 - (valor/19.952);
    desloc(sair) = desloc(sair-1) + (speed(sair)*(T(sair)-T(sair-1)));
    %
    sair = sair+1;
    %
end
%
% *****
% ***** Fim da Subrotina Deslocamento *****
% *****
```

Subrotina *integral*:

```
% *****
% ***** Início da Subrotina Integral *****
% *****
%
function [valor] = simpson(F,L,desloc)
%
valor = 0;
sair = 1;
while sair<=L
    %
    if (sair==1)
        valor(sair) = F(sair);
```

```
elseif ((sair>1)&&(sair<L)&&(rem(sair,2)~=0))
    valor(sair) = valor(sair-1)+(4*F(sair));
elseif ((sair>1)&&(sair<L)&&(rem(sair,2)==0))
    valor(sair) = valor(sair-1)+(2*F(sair));
elseif (sair==L)
    valor(sair) = valor(sair-1)+F(sair);
end
sair=sair+1;
end
%
valor = ((desloc(2)-desloc(1))/3)*valor;
%
% *****
% ***** Fim da Subrotina Integral *****
% *****
```

Subrotina *media*:

```
% *****
% ***** Início da Subrotina Média Móvel *****
% *****
%
function [mm,displa] = moving_average(F,L,K,NN,desloc)
%
sair = 1;
while sair<=L
    valor = 0;
    parar = (sair-K+1);
    while parar<=(sair+K)
        if ((parar<1)||parar>L)
            valor = valor;
        else
            valor = valor + F(parar);
        end
    end
end
```

```

    parar = parar + 1;
end
mm(sair) = valor/NN;
sair = sair + 1;
end
%
sair = 2;
displa(1) = desloc(1);
while sair<=(L-K)
    displa(sair) = displa(sair-1) + (desloc(L)/(L-NN));
    sair = sair + 1;
end
%
% *****
% ***** Fim da Subrotina Média Móvel *****
% *****

```

Subrotina *plot_window*:

```

function [eixo_f,valores] = plot_hz(x,fs,Nr)
%
sinal_fft = fft(x,Nr);
sinal_abs = abs(sinal_fft)*2/length(x);
%
meio = round(length(sinal_fft)/2);
f = (0:length(sinal_fft)-1)*fs/length(sinal_fft);
%
eixo_f = f(1:meio);
valores = sinal_abs(1:meio);
%
bar(eixo_f/1000,valores,'b');
%

```

Subrotina *mfle*:

```
% *****
% ***** Início da Subrotina MFLE *****
% *****
%
function [Kld,fratura,led] = fragil(desloc,mm,L,trinca,espessura,largura,apoio)
%
x(1) = 0;
sair = 2;
while sair<L
    %
    x(sair)=(mm(sair)-mm(sair-1))/(desloc(sair)-desloc(sair-1));
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
%
xx(1) = 0;
sair = 2;
while sair<(length(x))
    %
    xx(sair)=(x(sair)-x(sair-1))/(desloc(sair)-desloc(sair-1));
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
%
x = abs(x);
[derx,posx] = max(x);
%
figure(1);
plot(desloc,mm/1000,'b');
title('Força vs Tempo - Identifique os pontos que definem a fase elástica');
xlabel('Tempo (ms)');
```

```
ylabel('Força (kN)');
axis tight;
[x1,y1]=ginput(2);
close all;
%
sair = 1;
parar = 1;
while (parar==1)&&(sair<=L)
    %
    if x1(1,1)<=desloc(sair)
        here1 = sair;
        parar = 0;
    end
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
%
sair = here1;
if here1<=0
    sair = 1;
end
parar = 1;
while (parar==1)&&(sair<=L)
    %
    if x1(2,1)<=desloc(sair)
        here2 = sair;
        parar = 0;
    end
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
if sair>=L
```

```

    here2 = L;
end
%
coefang = ((mm(here2)-mm(here1))/(here2-here1));
%
sair = here2+1;
parar = 1;
[lixo,Index]=max(mm);
%
while (parar==1)&&(sair<=L)
    %
    reta = (mm(sair)-mm(here1))/(sair-here1);
    %
    if (reta<(0.98*coefang))&&(sair<=Index)
        led = sair;
    end
    %
    if reta<(0.95*coefang)
        fratura = sair;
        parar = 0;
    end
    %
    sair = sair +1;
    %
end
%
popin = menu('A curva apresentou popin ?',' SIM ',' NÃO ');
if (popin==1)
    %
    figure(1);
    plot(desloc,mm/1000,'b');
    title('Força vs Tempo - Aponte o ponto em que ocorreu pop-in');
    xlabel('Tempo (ms)');
    ylabel('Força (kN)');
end

```

```
axis tight;
[popx,popy]=ginput(1);
close all;
%
sair = 1;
parar = 1;
while (parar==1)&&(sair<=L)
    %
    if popx<=desloc(sair)
        led = sair;
        parar = 0;
    end
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
%
end
%
% *****
% Cálculo da Tenacidade à Fratura
% *****
%
Fiu = max(mm);
%
W3 = largura^(3/2);
aw0 = (trinca/largura);
aw1 = (trinca/largura)^(1/2);
aw3 = (trinca/largura)^(3/2);
aw5 = (trinca/largura)^(5/2);
aw7 = (trinca/largura)^(7/2);
aw9 = (trinca/largura)^(9/2);
a2w2 = (trinca^2)/(largura^2);
%
```

% Método 1

%

$M = 1.93 - (3.07 * (\text{trinca} / \text{largura})) + (14.53 * ((\text{trinca} / \text{largura})^2)) -$
 $(25.11 * ((\text{trinca} / \text{largura})^3)) + (25.8 * ((\text{trinca} / \text{largura})^4));$

$f_u = (F_{iu} * \text{apoio}) / 4;$

%

$K_{Id} = (6 * f_u * M * (\text{trinca}^{0.5})) / (\text{espessura} * (\text{largura}^2));$

$K_{Id} = K_{Id} / 1E6;$

%

% *****

% ***** Fim da Subrotina MFLE *****

% *****

Subrotina *grafico1*:

% *****

% ***** Início da Subrotina Gráficos *****

% *****

%

function [trash] =

graf1(tempo,displa,desloc,forca,media,energia,ener_orig,L,MM,sj,mmj,fa)

%

% Força vs tempo - Preparativos

%

figure(1);

plot(desloc,media./1000,'b');

title('Força vs Tempo - Entre com a região a ser plotada');

xlabel('Deslocamento [m]');

ylabel('Força [kN]');

axis tight;

[poi,pof]=ginput(2);

close all;

%

sair = 1;

```

parar = 1;
while (parar==1)&&(sair<=L)
    %
    if poi(1,1)<=desloc(sair)
        po1 = sair;
        parar = 0;
    end
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
%
sair = 1;
parar = 1;
while (parar==1)&&(sair<=L)
    %
    if poi(2,1)<=desloc(sair)
        po2 = sair;
        parar = 0;
    end
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
%
kill = desloc(po1);
desloc(:)=(desloc(:))-kill;
kill = tempo(po1);
tempo(:)=(tempo(:))-kill;
%
% Gráfico Força vs Tempo - Original
%
figure(1)
plot((1000*tempo(po1:po2)),forca(po1:po2)./1000,'b');

```

```

title('Força vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força','Location','Best');
axis tight;
if (MM==1)
    print -dbitmap 'P_t_Cutelo_orig.bmp'
elseif (MM==2)
    print -dbitmap 'P_t_CP_orig.bmp'
end
%
% Gráfico Força vs Tempo - Comparação original com a média móvel
%
figure(2)
plot((1000*tempo(po1:po2)),forca(po1:po2)./1000,'m',1000*tempo(po1:po2),media(po
1:po2)./1000,'b');
title('Força vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - original','Força - média móvel','Location','Best');
axis tight;
if (MM==1)
    print -dbitmap 'P_t_Cutelo_comp.bmp'
elseif (MM==2)
    print -dbitmap 'P_t_CP_comp.bmp'
end
%
% Gráfico Força vs Deslocamento - Comparação original com a média-móvel
%
figure(3)
plot((1000*desloc(po1:po2)),forca(po1:po2)./1000,'m',1000*desloc(po1:po2),media(p
o1:po2)./1000,'b');
title('Força vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');

```

```

ylabel('Força [kN]');
legend('Força - original','Força - média móvel','Location','Best');
axis tight;
if (MM==1)
    print -dbitmap 'P_d_Cutelo.bmp'
elseif (MM==2)
    print -dbitmap 'P_d_CP.bmp'
end
%
% Gráfico Força e Energia vs Deslocamento
%
figure(4)
if (max(energia))<(10*(max(media)))

plot(1000*(tempo(po1:po2)),media(po1:po2)./1000,'b',1000*tempo(po1:po2),energia(
po1:po2),'r');
end
if (max(energia))>=(10*(max(media)))

plot(1000*(tempo(po1:po2)),media(po1:po2)./100,'b',1000*tempo(po1:po2),energia(p
o1:po2),'r');
end
title('Força vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Força [kN] , Energia [J]');
legend('Força','Energia','Location','Best');
axis tight;
if (MM==1)
    print -dbitmap 'P_E_Cutelo.bmp'
elseif (MM==2)
    print -dbitmap 'P_E_CP.bmp'
end
%
% Gráfico Energia vs Deslocamento - comparação

```

```
%
figure(5)
if (max(energia))<(10*(max(media)))

plot((1000*desloc(po1:po2)),media(po1:po2)./1000,'b',1000*desloc(po1:po2),energia(
po1:po2),'r');
end
if (max(energia))>=(10*(max(media)))

plot((1000*desloc(po1:po2)),media(po1:po2)./100,'b',1000*desloc(po1:po2),energia(p
o1:po2),'r');
end
title('Energia vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN] , Energia [J]');
legend('Energia - original','Energia - média móvel','Location','Best');
axis tight;
if (MM==1)
    print -dbitmap 'P_E_Cutelo.bmp'
elseif (MM==2)
    print -dbitmap 'P_E_CP.bmp'
end
%
% Gráfico Energia vs Deslocamento
%
figure(6)
plot(1000*desloc(po1:po2),ener_orig(po1:po2),'b',1000*desloc(po1:po2),energia(po1:
po2),'r');
title('Energia vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento (mm)');
ylabel('Energia (J)');
legend('Energia - original','Energia - média móvel','Location','NorthEast');
axis tight;
print -dbitmap 'pontos.bmp'
```

```
%
% Gráfico Deslocamento vs Tempo
%
figure(7)
plot(1000*tempo(po1:po2),1000*displa(po1:po2),'b',1000*tempo(po1:po2),1000*desl
oc(po1:po2),'r');
title('Deslocamento vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Deslocamento [mm]');
legend('Deslocamento - original','Deslocamento - média
móvel','Location','NorthWest');
axis tight;
print -dbitmap 'd_t.bmp'
%
% Gráfico FFT
%
figure(8)
if length(sj)==1024
    plot_window(sj,fa,1024);
    hold on;
    plot_window2(mmj,fa,1024);
elseif length(sj)==2048
    plot_window(sj,fa,2048);
    hold on;
    plot_window2(mmj,fa,2048);
elseif length(sj)==4096
    plot_window(sj,fa,4096);
    hold on;
    plot_window2(mmj,fa,4096);
end
xlabel('Frequência (kHz)');
ylabel('Amplitude (N)');
legend('Sinal original','Após média móvel','Location','NorthEast');
title('FFT do sinal');
```

```
axis tight;
hold off;
print -dbitmap 'fft.bmp'
%
trash = 1;
%
% *****
% ***** Fim da Subrotina Gráfico *****
% *****
```

Subrotina *grafico2*:

```
% *****
% ***** Início da Subrotina Gráficos *****
% *****
%
function [trash] =
graf2(tempo,displa1,displa2,desloc1,desloc2,forca1,forca2,media1,media2,energia1,
energia2,ener_orig1,ener_orig2,L1,sj1,mmj1,sj2,mmj2,fa)
%
% Força vs tempo - Preparativos
%
figure(1);
plot(desloc1,media1./1000,'b');
title('Força vs Tempo - Entre com a região a ser plotada');
xlabel('Deslocamento [m]');
ylabel('Força [kN]');
axis tight;
[poi,pof]=ginput(2);
close all;
%
sair = 1;
parar = 1;
while (parar==1)&&(sair<=L1)
```

```
%
if poi(1,1)<=desloc1(sair)
    po1 = sair;
    parar = 0;
end
%
sair = sair + 1;
%
end
%
sair = 1;
parar = 1;
while (parar==1)&&(sair<=L1)
    %
    if poi(2,1)<=desloc1(sair)
        po2 = sair;
        parar = 0;
    end
    %
    sair = sair + 1;
    %
end
%
kill = desloc1(po1);
desloc1(:)=(desloc1(:))-kill;
kill = tempo(po1);
tempo(:)=(tempo(:))-kill;
%
% Gráfico Força vs Tempo - Original
%
figure(1)
plot((1000*tempo(po1:po2)),forca1(po1:po2)./1000,'b',(1000*tempo(po1:po2)),forca2(
po1:po2)./1000,'m');
title('Força vs Tempo');
```

```

xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - cutelo','Força - cp','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_t_orig.bmp'
%
% Gráfico Força vs Tempo - Comparação original com a média móvel
%
figure(2)
plot((1000*tempo(po1:po2)),forca1(po1:po2)./1000,'c',1000*tempo(po1:po2),media1(
po1:po2)./1000,'b');
title('Força (cutelo) vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - original','Força - média móvel','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_t_cutelo_comp.bmp'
%
figure(3)
plot((1000*tempo(po1:po2)),forca2(po1:po2)./1000,'c',1000*tempo(po1:po2),media2(
po1:po2)./1000,'b');
title('Força (cp) vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - original','Força - média móvel','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_t_cp_comp.bmp'
%
% Gráfico Força vs Deslocamento - Comparação original com a média móvel
%
figure(4)
plot(1000*desloc1(po1:po2),forca2(po1:po2)./1000,'b',(1000*desloc1(po1:po2)),forca
1(po1:po2)./1000,'m');
title('Força vs Deslocamento');
```

```

xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - cutelo','Força - cp','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_d_orig.bmp'
%
figure(5)
plot(1000*desloc1(po1:po2),media2(po1:po2)./1000,'b',(1000*desloc1(po1:po2)),media1(po1:po2)./1000,'m');
title('Força (média móvel) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - cutelo','Força - cp','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_d_media.bmp'
%
figure(6)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),forca1(po1:po2)./1000,'c',1000*desloc1(po1:po2),media1(po1:po2)./1000,'b');
title('Força (cutelo) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - original','Força - média móvel','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_d_cutelo.bmp'
%
figure(7)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),forca2(po1:po2)./1000,'c',1000*desloc1(po1:po2),media2(po1:po2)./1000,'b');
title('Força (cp) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN]');
legend('Força - original','Força - média móvel','Location','Best');
axis tight;

```

```
print -dbitmap 'P_d_cp.bmp'

%
% Gráfico Força e Energia vs Deslocamento
%
figure(8)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),media1(po1:po2)./1000,'b',(1000*desloc1(po1:po2)),me
dia2(po1:po2)./1000,'r',1000*desloc1(po1:po2),energia1(po1:po2),'g',1000*desloc1(p
o1:po2),energia2(po1:po2),'m');
%
title('Força e Energia vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN] , Energia [J]');
legend('Força - cutelo','Força - cp','Energia - cutelo','Energia - cp','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_E.bmp'

%
figure(9)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),media1(po1:po2)./1000,'b',1000*desloc1(po1:po2),ener
gia1(po1:po2),'r');
%
title('Força e Energia (cutelo) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN] , Energia [J]');
legend('Força','Energia','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_E_cutelo.bmp'

%
figure(10)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),media2(po1:po2)./1000,'b',1000*desloc1(po1:po2),ener
gia2(po1:po2),'r');
%
title('Força e Energia (cp) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Força [kN] , Energia [J]');
```

```

legend('Força','Energia','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'P_E_cp.bmp'
%
% Gráfico Energia vs Deslocamento - comparação
%
figure(11)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),ener_orig1(po1:po2),'b',1000*desloc1(po1:po2),energia
1(po1:po2),'r',(1000*desloc1(po1:po2)),ener_orig2(po1:po2),'g',1000*desloc1(po1:po
2),energia2(po1:po2),'m');
title('Energia (cutelo) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Energia [J]');
legend('Energia (cutelo) - original','Energia (cutelo) - média móvel','Energia (cp) -
original','Energia (cp) - original','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'E_comp.bmp'
%
figure(12)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),ener_orig1(po1:po2),'b',1000*desloc1(po1:po2),energia
1(po1:po2),'r');
title('Energia (cutelo) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Energia [J]');
legend('Energia - original','Energia - média móvel','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'E_cutelo.bmp'
%
figure(13)
plot((1000*desloc1(po1:po2)),ener_orig2(po1:po2),'b',1000*desloc1(po1:po2),energia
2(po1:po2),'r');
title('Energia (cp) vs Deslocamento');
xlabel('Deslocamento [mm]');
ylabel('Energia [J]');

```

```

legend('Energia - original','Energia - média móvel','Location','Best');
axis tight;
print -dbitmap 'E_cp.bmp'
%
% Gráfico Deslocamento vs Tempo
%
figure(14)
plot(1000*tempo(po1:po2),1000*displa1(po1:po2),'b',1000*tempo(po1:po2),1000*des
loc1(po1:po2),'g',1000*tempo(po1:po2),1000*displa2(po1:po2),'r',1000*tempo(po1:po
2),1000*desloc2(po1:po2),'m');
title('Deslocamento vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Deslocamento [mm]');
legend('Deslocamento - cutelo','Deslocamento - cp','Location','NorthWest');
axis tight;
print -dbitmap 'd_t.bmp'
%
figure(15)
plot(1000*tempo(po1:po2),1000*displa1(po1:po2),'b',1000*tempo(po1:po2),1000*des
loc1(po1:po2),'r');
title('Deslocamento vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Deslocamento [mm]');
legend('Deslocamento - cutelo','Deslocamento - cp','NorthWest');
axis tight;
print -dbitmap 'd_t_cutelo.bmp'
%
figure(16)
plot(1000*tempo(po1:po2),1000*displa2(po1:po2),'b',1000*tempo(po1:po2),1000*des
loc2(po1:po2),'r');
title('Deslocamento vs Tempo');
xlabel('Tempo [ms]');
ylabel('Deslocamento [mm]');
legend('Deslocamento - cutelo','Deslocamento - cp','NorthWest');

```

```
axis tight;
print -dbitmap 'd_t_cp.bmp'
%
% Gráfico FFT
%
figure(17)
if length(sj1)==1024
    plot_window(sj1,fa,1024);
    hold on;
    plot_window2(mmj1,fa,1024);
elseif length(sj1)==2048
    plot_window(sj1,fa,2048);
    hold on;
    plot_window2(mmj1,fa,2048);
elseif length(sj1)==4096
    plot_window(sj1,fa,4096);
    hold on;
    plot_window2(mmj1,fa,4096);
end
xlabel('Frequência (kHz)');
ylabel('Amplitude (N)');
legend('Sinal original','Após média móvel','Location','NorthEast');
title('FFT do sinal');
axis tight;
hold off;
print -dbitmap 'fft_cutelo.bmp'
%
figure(18)
if length(sj2)==1024
    plot_window(sj2,fa,1024);
    hold on;
    plot_window2(mmj2,fa,1024);
elseif length(sj2)==2048
    plot_window(sj2,fa,2048);
```

```

    hold on;
    plot_window2(mmj2,fa,2048);
elseif length(sj2)==4096
    plot_window(sj2,fa,4096);
    hold on;
    plot_window2(mmj2,fa,4096);
end
xlabel('Frequência (kHz)');
ylabel('Amplitude (N)');
legend('Sinal original','Após média móvel','Location','NorthEast');
title('FFT do sinal');
axis tight;
hold off;
print -dbitmap 'fft_cp.bmp'
%
trash = 1;
%
% *****
% ***** Fim da Subrotina Gráfico *****
% *****

```