ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA POR Eduardo Leira Kruger E APROVADA PELA COMISSÃO JULGADORA EM 30/11/2009

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Charpy Instrumentado: Análise da Instrumentação e da Influência de Condições Metalúrgicas de um Aço de Ultra-alta Resistência Mecânica na Tenacidade à Fratura Dinâmica

09/2010

Autor: **Eduardo Leira Kruger**
Orientador: **Prof. Dr. Itamar Ferreira**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Charpy Instrumentado: Análise da Instrumentação e da Influência de Condições Metalúrgicas de um Aço de Ultra-alta Resistência Mecânica na Tenacidade à Fratura Dinâmica

Autor: **Eduardo Leira Kruger**
Orientador: **Prof. Dr. Itamar Ferreira**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2009
S.P . – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Kruger, Eduardo Leira
K939c Charpy instrumentado: análise da instrumentação e da influência de condições metalúrgicas de um aço de ultra-alta resistência mecânica na tenacidade à fratura dinâmica / Eduardo Leira Kruger. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Itamar Ferreira.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Mecânica da fratura. 2. Metais - Fratura. 3. Metais - Propriedades mecânicas. 4. Testes de impacto. I. Ferreira, Itamar. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Instrumented Charpy: analysis of the instrumentation and the effect of different metallurgical conditions of an ultra-high strength steel on the dynamic fracture toughness
Palavras-chave em Inglês: Fracture mechanics, Fracture of metals, Mechanical properties of metals, Impact testing
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: Ruís Camargo Tokimatsu, Juno Gallego, Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Célia Marina de Alvarenga Freire
Data da defesa: 30/11/2009
Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

TESE DE DOUTORADO

Charpy Instrumentado: Análise da Instrumentação e da Influência de Condições Metalúrgicas de um Aço de Ultra-alta Resistência Mecânica na Tenacidade à Fratura Dinâmica

Autor: **Eduardo Leira Kruger**
Orientador: **Prof. Dr. Itamar Ferreira**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Itamar Ferreira, Presidente
Instituição: DEMA / FEM / UNICAMP

Prof. Dr. Ruís Camargo Tokimatsu
Instituição: UNESP / ILHA SOLTEIRA

Prof. Dr. Juno Gallego
Instituição: UNESP / ILHA SOLTEIRA

Prof. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
Instituição: DEMA / FEM / UNICAMP

Prof. Dra. Célia Marina de Alvarenga Freire
Instituicão: DEMA / FEM / UNICAMP

Campinas, 30 de novembro de 2009

Dedicatória:

Dedico este trabalho à Deus, à minha companheira e esposa Luana, à minha filha Liz, ao meu filho Eduardo e meus familiares que me apoiaram.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao Prof. Itamar Ferreira pelas orientações, discussões e ensinamentos durante o trabalho.

Ao professor e coordenador do Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais Ruís Camargo Tokimatsu da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP que não mediu esforços na realização dos ensaios de impacto e pelos diversos ensinamentos.

Ao professor e coordenador do Laboratório de Solidificação Rubens Caran Júnior, que me concedeu espaço para os tratamentos térmicos.

Aos Técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica José Luiz Lisboa e Claudenete Vieira Leal pela dedicação intensa na execução dos ensaios.

Ao amigo Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues pelo companheirismo e esclarecimento na área de programação computacional.

Aos colegas de Pós-graduação Enrico José Giordani, Antonio Teodoro Dutra Junior, Maria C. M. Loffredo, Marcelo Braz de Aquino, Sérgio J. Idehara.

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

A diferença entre o possível e o impossível está na vontade humana.
Louis Pasteur

Resumo

KRUGER, Eduardo Leira, *Charpy Instrumentado: Análise da Instrumentação e da Influência de Condições Metalúrgicas de um Aço de Ultra-alta Resistência Mecânica na Tenacidade à Fratura Dinâmica*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009. 129 p. Tese (Doutorado)

O ensaio Charpy clássico, utilizado desde o início do século XX, permite determinar a energia global de fratura, propriedade mecânica conhecida como tenacidade. Esta energia tem caráter qualitativo e na aplicação no projeto estrutural, reduz-se a comparações entre as curvas de transição dúctil-frágil dos materiais. Com o surgimento da instrumentação do ensaio Charpy clássico é possível determinar a propriedade mecânica, tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id}, muito utilizada na Mecânica de Fratura. O objetivo deste trabalho é analisar o sistema de instrumentação desenvolvido de acordo com a normatização ISO 14556(2000) para uma máquina de ensaio Charpy clássico, determinar e avaliar a tenacidade à fratura dinâmica, a partir do ensaio Charpy instrumentado, do aço AISI 4340 sob várias condições metalúrgicas obtidas através de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento nas temperaturas de 473K, 573K, 673K e 773K.
Foi observado que o sistema de instrumentação da máquina, a interpretação dos resultados dos esforços envolvidos no processo de fratura e o tempo para fratura são parâmetros de influência na determinação da tenacidade à fratura dinâmica.

Palavras Chave: Tenacidade à fratura dinâmica, Ensaio de impacto instrumentado

Abstract

KRUGER, Eduardo Leira, *Instrumented Charpy: Analysis of the instrumentation and the effect of different metallurgical conditions of an ultra-high strength steel on the dynamic fracture toughness*, Campinas: College of Mechanical Engineering, University of Campinas, 2009. 129 p. Doctoral Thesis.

The classical Charpy test is used since 1900 and it is possible to determine from it the global energy for deformation and fracturing the specimen and this energy is named toughness which is important for selection steels considering ductile-brittle transition temperature. The Instrumented Charpy test is very important because it produces more material parameters, for example, the dynamic fracture toughness (K_{Id}), that can be used in Fracture Mechanics. However, there are several difficulties associated with the instrumentation of the impact machine ant processing digital signal, mainly in terms of the interpretation instrumented impact test results. The purpose of this work is to analyze the instrumentation system developed in accordance with normalization ISO 14556 (2000) to an Charpy machine and to determine and analyze the dynamic fracture toughness of the AISI 4340 steel in some metallurgical conditions obtained from treatment of quenching and tempering at 473K, 573K, 673K, and 773K. It was observed that the instrumentation system, the interpretation of the loads involved in the process of fracture and time to fracture are significant parameters in determining the dynamic fracture toughness.

Key words: Dynamic fracture toughness, Instrumented Charpy.

Sumário

Lista de Figuras xi

Lista de Tabelas xv

Nomenclatura xvii

Capítulo 1 - Introdução **1**

1.1. Considerações iniciais 1

1.2. Estrutura do Trabalho 2

1.3. Justificativas e Objetivos 2

1.4. Ensaio Charpy Instrumentado 5

Capítulo 2 - Revisão da Literatura **17**

2.1. Considerações iniciais 17

2.2. O fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id} 19

2.3. Avaliação da Tenacidade à Fratura Dinâmica proposta por Kalthoff e Böhme 21

2.4. Avaliação da tenacidade à fratura dinâmica proposta por Kobayashi, Yamamoto e Niinomi 34

2.5. Efeito da vibração e deformação elástica da máquina de teste Charpy na tenacidade à fratura dinâmica (Yamamoto et al., 1993) 42

Capítulo 3 - Materiais e Métodos **46**

3.1. Considerações iniciais 46

3.2. Materiais 47

3.3. Métodos Experimentais 47

3.3.1 Confecção dos corpos de prova 47

3.3.2 Metodologia para obtenção da pré trinca nos corpos de prova 53

3.3.3 Ensaios Mecânicos 55

3.3.4 Procedimentos na determinação do fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id} 61

Capítulo 4 - Resultados e Discussão **64**

4.1. Considerações iniciais 64

4.2. Ensaio de Dureza 66

4.3. Ensaio de Tração 66

4.4. Ensaio de Tenacidade à Fratura – Carregamento monotônico 69

4.5. Ensaio de Impacto Instrumentado 73

4.5.1 Energia global absorvida 74

4.5.2 Tratamento do sinal capturado durante o processo de fratura por impacto 79

4.5.3 Força de iniciação de trinca envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhe arredondado e entalhe com pré trinca 83

4.5.4 Força máxima envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhe arredondado e com pré trinca 88

4.5.5 Fator de intensidade de tensão monotônico e dinâmico 92

Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos **102**

Referências Bibliográficas **106**

Anexo 1: Rotina computacional para determinar a curva de resposta ao impacto **115**

Anexo 2: Curvas dos ensaios de impacto instrumentados e fractografias **119**

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Comparação entre o sinal medido e o sinal esperado. 06

Figura 1.2 - Resposta força - tempo para um aço de média resistência mecânica. 09

Figura 1.3 – Comparação da resistência obtida pelo ensaio de tensão por impacto e ensaio Charpy-V. 12

Figura 1.4 – Curvas Carregamento - Deslocamento - Energia absorvida para diferentes temperaturas utilizando laser (transdutor de deslocamento). 14

Figura 1.5 – Curvas idealizadas do ensaio Charpy instrumentado. 15

Figura 2.1 – Representação esquemática da metodologia empregada por Kalthoff et al. 23

Figura 2.2 – Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica, K_{Id}, a partir da Curva de Resposta ao Impacto. 24

Figura 2.3 – Curva de Resposta ao Impacto para corpos de prova Charpy pré-trincados ensaiados em diferentes velocidades de impacto. 25

Figura 2.4 – Influência de alguns parâmetros de testes (quase estático). 29

Figura 2.5 – Fatores de Intensidade de Tensão obtidos da formulação quase estática(ASTM E 399), K_I^{stat}, dinamicamente(Tec. Sombra óptica), K_I^{dyn}, e o $K_I^{q.s.}$ calculado numericamente. 30

Figura 2.6 – Função de Correção Dinâmica, k^{dyn}, calculada a partir dos dados obtidos na Figura 2.8. 30

Figura 2.7 – Valores de Correção Dinâmico, k^{dyn}. 31

Figura 2.8 – Efeitos Dinâmicos no impacto. 31

Figura 2.9 – Função de Correção Dinâmica para quatro tipos de corpo de prova. 32

Figura 2.10 – Curva de Resposta ao Impacto para diferentes velocidades de impacto e curva de $K_d(t)$ para v_o=0,46m/s. 36

Figura 2.11 – Explicação esquemática do Método Taxa de Alteração da Flexibilidade. 37

Figura 2.12 – Explicação esquemática do método da curva chave (Δa representa a extensão da trinca). 38

Figura 2.13 – Extensão da trinca em função do deslocamento para corpos de prova Charpy (aço A533B). 39

Figura 2.14 – Representação esquemática do método do teste interrompido. 40

Figura 2.15 – Análise comparativa dos métodos para determinar o ponto de iniciação da trinca. (a) B=10*mm* e (b) B=5*mm*. 40

Figura 2.16 – (a) Resposta no tempo do martelo no impacto e (b) Resposta no tempo do martelo sob efeito do martelo de impacto. 42

Figura 2.17 – Espectro em freqüência dos sinais da Figura 2.16. 42

Figura 2.18 – Forma de vibrar do martelo na freqüência natural. 43

Figura 2.19 – Curvas força em função do tempo e deslocamento em função do tempo em diferentes velocidades de impacto. 43

Figura 2.20 – Comparação entre os valores de energia absorvida sem o método da correção da flexibilidade e com o método. 45

Figura 3.1 – Corpo de prova de ensaio de impacto do Tipo A conforme a norma ASTM E23. 48

Figura 3.2 – Corpo de prova de ensaio de flexão com entalhe em V e posição dos furos para fixação do *Clip on gage*. 48

Figura 3.3 – Corpo de prova de ensaio de tração conforme a norma ASTM E08M. 49

Figura 3.4 – Esquema do sistema de tratamentos térmicos. 50

Figura 3.5 – Detalhe do forno, controlador e multímetro digital. 50

Figura 3.6 – Perfil de temperatura do forno tubular. 52

Figura 3.7 – Curva temperatura em função do tempo para o tratamento de austenitização. 52

Figura 3.8 – Curvas temperatura em função do tempo para os tratamentos de revenido. 53

Figura 3.9 - Representação esquemática dos comprimentos dos estágios da pré-trinca e a faixa recomendável para o comprimento final. 54

Figura 3.10 – Montagem experimental para o ensaio de tração. 56

Figura 3.11 – Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos com carregamento monotônico. 57

Figura 3.12 - Montagem experimental para o ensaio de flexão em três pontos. 57

Figura 3.13 - Detalhe a fixação dos *Knife edges* no corpo de prova. 57

Figura 3.14 - Representação esquemática do sistema de medida do ensaio de impacto Charpy instrumentado. 58

Figura 3.15 – Cutelo desenvolvido para colagem dos extensômetros. 59

Figura 3.16 – Arquitetura de medida instalada na máquina de ensaio de impacto Charpy convencional. 60

Figura 3.17 – Esquema para determinação do fator de intensidade de tensão dinâmico a partir dos resultados de força de iniciação da trinca 63

Figura 4.1 – Curva de dureza Rockwell na escala C em função da temperatura de revenido para as condições ensaiadas. 67

Figura 4.2 – Curvas limite de escoamento/limite de resistência/dureza em função da temperatura de revenido. 68

Figura 4.3 – Aspecto da superfície de fratura do corpo-de-prova de tração na condição de como-temperado / modo de fratura: intergranular. 69

Figura 4.4 – Aspecto da superfície de fratura do corpo-de-prova de tração na condição de R7 (revenido a 773K) / modo de fratura: microcavidades. 69

Figura 4.5 – Fator de intensidade de tensão monotônico das condições microestruturais e as respectivas fractografias. 74

Figura 4.6 – Energia global em função da temperatura de revenido para o processo de fratura de corpos-de-prova com entalhe arredondado. 76

Figura 4.7 – Energia global em função da temperatura de revenido para o processo de fratura de corpos de prova com pré trinca de fadiga. 78

Figura 4.8 – Sinal bruto e sinal filtrado da condição térmica de revenido a 773 K, entalhe arredondado, ensaio de impacto. 81

Figura 4.9 – Sinal de força-deslocamento dos corpos-de-prova entalhados do aço ABNT 4340, evidenciando os sinais sem filtragem (Sinal Bruto), com polimento pela média móvel e filtrado pela freqüência (Wavelets), Revenido à 773K. 82

Figura 4.10 - Representação esquemática do fluxo de cálculo da força de iniciação da trinca. 83

Figura 4.11 - Curvas Força de iniciação da trinca em função da temperatura de revenido em corpos de prova com entalhe arredondado. 86

Figura 4.12 - Curvas Força de iniciação da trinca em função da temperatura de revenido em corpos de prova com pré trinca. 88

Figura 4.13 – Curvas força em função do deslocamento de duas condições térmicas ensaiadas com entalhe arredondado. a) Como temperado; b) Revenido a 673K. 89

Figura 4.14 - Curvas Força máxima em função da temperatura de revenido em corpos de prova com entalhe arredondado. 90

Figura 4.15 - Curvas Força máxima em função da temperatura de revenido em corpos de prova com pré trinca. 91

Figura 4.16 – Curvas de reposta ao impacto para a/W=0,465 e V_0=5,50m/s 92

Figura 4.17 – Curvas características força-deslocamento classificadas pela norma ISSO. 98

Figura 4.18 - Curvas de reposta do ensaio de impacto instrumentado realizado na condição do corpo-de-prova com entalhe arredondado na condição microestrutural: (a) como temperado e (b) revenido 773K e entalhe arredondado. 99

Figura 4.19 – Curvas do ensaio de impacto instrumentado em corpos de prova com pré trinca e os respectivos micromecanismos de fratura. 100

Figura A.1 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de como temperado e entalhe arredondado. 120

Figura A.2 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 473K e entalhe arredondado. 121

Figura A.3 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 573K e entalhe arredondado. 122

Figura A.4 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 673K e entalhe arredondado. 123

Figura A.5 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 773K e entalhe arredondado. 124

Figura A.6 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de como temperado e corpo de prova temperado e pré trinca. 125

Figura A.7 – Curva do ensaio de impacto instrumentado condição revenido a 473K e corpo de prova com pré trinca. 126

Figura A.8 – Curva do ensaio de impacto instrumentado condição revenido a 573K e corpo de prova com pré trinca. 127

Figura A.9 – Curva do ensaio de impacto instrumentado condição revenido a 673K e corpo de prova com pré trinca. 128

Figura A.10 – Curva do ensaio de impacto instrumentado condição revenido a 773K e corpo de prova com pré trinca. 129

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Valores das funções f e g para correções e variações dinâmicas do comprimento da trinca. Fonte: Kalthoff, Winkler e Böhme (1985). 27

Tabela 2.2– Valores de tenacidade à fratura dinâmica J_d obtidos pelos métodos da taxa da alteração da flexibilidade e pelo método do teste interrompido. Fonte: Kobayashi et al. (1989) 41

Tabela 3.1 – Composição química realizada no laboratório de ensaios de materiais CT/Unicamp. 47

Tabela 3.2 – Faixa de composição química (% em peso) do aço ABNT 4340. 47

Tabela 3.3 – Especificações técnicas dos materiais utilizados nos tratamentos térmicos. 51

Tabela 3.4 - Valores de carga aplicada e freqüência utilizada nos estágios em função da condição de tratamento térmico. 55

Tabela 4.1 – Valores de dureza, resultantes das diferenças de tratamento térmico. 66

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração. 68

Tabela 4.3 – Valores de força de iniciação de trinca, em kN, para as condições microestruturais e severidades de entalhe. 70

Tabela 4.4 – Valores de força máxima, em kN, para as condições microestruturais e severidades de entalhe. 71

Tabela 4.5 – Valores de K_Q e a relação entre K_Q e K_{IC} das condições ensaiadas. 72

Tabela 4.6 – Resultados de energias globais [J] obtidas a partir do processo de fratura de corpo de prova com entalhe arredondado. 75

Tabela 4.7 – Diferença percentual entre a energia lida no indicador da Máquina [E_D] e as energias dos ensaios do Sistema de Medida de Impacto Instrumentado [E_{IW} e E_{GC}], entalhe arredondado. 76

Tabela 4.8 – Resultados de energias globais [J] obtidas a partir do processo de fratura de corpo de prova com pré trinca de fadiga. 77

Tabela 4.9 – Diferença percentual entre a energia lida no Dial [ED] e as energias dos ensaios de impacto instrumentado [EIW e EGC], em corpos de prova com pré trinca de fadiga. 78

Tabela 4.10 – Resultados de Força de Iniciação da Trinca (Fiu), entalhe arredondado. 84

Tabela 4.11 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca do ensaio monotônico e o ensaio dinâmico (F_{iuMM} e F_{iuW}), entalhe arredondo. 85

Tabela 4.12 – Resultados de Força de Iniciação da Trinca (Fiu), corpo de prova com pré-trinca. 87

Tabela 4.13 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca monotônico (F_{iuM}), o valor da Carga P_5 e o sinal dinâmico (F_{iuMM}), corpo de prova com pré-trincado. 87

Tabela 4.14 – Resultados de Força Máxima (F_m), entalhe arredondado. 89

Tabela 4.15 – Resultados de Força Máxima (F_m), corpo de prova com pré-trincado. 91

Tabela 4.16 – Valores de Fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id}, calculados a partir dos resultados de força máxima do ensaio de impacto instrumentado de corpos de prova com pré trinca. 97

Nomenclatura

F – Força [N]

$\mathbf{K_Q}$ – fator de intensidade de tensão [$MPa\sqrt{m}$]

$\mathbf{K_{IC}}$ – tenacidade à fratura em deformação plana [$MPa\sqrt{m}$]

$\mathbf{K_{Id}}$ – tenacidade à fratura dinâmica ou ao impacto [$MPa\sqrt{m}$]

$\mathbf{K_I^{dyn}}$ - estado de tensão dinâmico na ponta do trinca

$\mathbf{K_I^{q.s.}(t)}$ – carregamento total dinâmico em função do tempo na ponta da trinca

$\mathbf{k^{dyn}}$ **–** função de correção dinâmica

a – comprimento da trinca [mm]

w – largura do corpo de prova [mm]

B – espessura do corpo de prova [mm]

$\boldsymbol{\tau}$ - período das oscilações

S – vão da base de apoio do corpo de prova da máquina de impacto [mm]

E – módulo de Elasticidade [GPa]

$\mathbf{E_{eff}}$ - módulo de Elasticidade Efetivo [GPa]

G – módulo de cisalhamento [GPa]

$\mathbf{S_0}$ – velocidade do som no corpo de prova [mm/s]

$\mathbf{C_s}$, $\mathbf{C_o}$ – flexibilidade do corpo de prova

$\mathbf{T_R}$ – tempo de resposta da instrumentação a uma atenuação da amplitude do sinal igual a $0{,}915dB$

R – flexibilidade da máquina de ensaio de impacto [$GN/m^{5/2}$]

W, $\mathbf{E_s}$, $\mathbf{E_t}$ – energia absorvida pelo corpo de prova [J]

$\mathbf{E_m}$ – energia absorvida pela deformação elástica dos componentes mecânicos da máquina de ensaio [J]

$\mathbf{E_f}$ – energia consumida na flexão e fratura do corpo de prova [J]

E_k – energia consumida para lançar as partes do corpo de prova fraturado [J]

E_i – energia absorvida pelo corpo de prova até o ponto de iniciação da trinca [J]

V_0, v_0 – velocidade de impacto do martelo [m/s]

Subscritos

iu – iniciação de trinca

m – máxima

MM – filtragem pelo método da Média Móvel

W – filtragem pelo método de Wavelets

sF – sem nenhum método de filtragem

I – resultados de ensaio impacto

M – resultados do ensaio monotônico

A – corpos de prova com entalhe arredondado

P – corpos de prova pré trincados

D – energia lida no dial da máquina de impacto convencional

SMI – Sistema de medida de impacto instrumentado

IW – Instron Wolpert

••

Siglas

CAI - Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing

CRI – Impact Response Curve (curva de resposta ao impacto)

CCR – Compliance Change Rate (taxa de alteração da flexibilidade)

ASTM – American Society for Testing of Materials

••

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O ensaio Charpy instrumentado tem sido estudado desde a década de 1970, quando Ireland (1977), nos Estados Unidos, firmou-se como um ícone no estudo aprofundado da instrumentação aplicada ao ensaio Charpy convencional. O pesquisador procurou conhecer profundamente o comportamento da resposta do corpo de prova submetido ao impacto.

A idéia de conhecer a resposta do ensaio de impacto instrumentado era fundamental para aplicar os resultados obtidos na Mecânica de Fratura e assim determinar o fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id}. Porém, a metodologia para determinar o fator ainda era um obstáculo a ser transposto, já que considerações monotônicas foram aplicadas nos resultados do impacto instrumentado e não considerava os efeitos inerciais no corpo de prova. Ireland, preocupado com os efeitos inerciais, propôs critérios para validar a resposta do ensaio de impacto instrumentado.

Em 1982, os pesquisadores como Böhme e Kalthoff propuseram uma metodologia baseada no tempo de fratura e o conceito da *Impact Response Curve* (Curva de resposta ao impacto) que determinava o fator de intensidade de tensão dinâmico. Esta metodologia atualmente é largamente utilizada na comunidade científica e em aplicações de engenharia.

A contribuição de se estudar o fator K_{Id} é fundamental na análise de estruturas ou componentes mecânicos submetidos a carregamentos dinâmicos. Normalmente este tipo de carregamento ocorre em gradientes de temperatura elevados, queda de pressão acentuada, e movimentos de fluídos em dutos.

1.2. Estrutura do Trabalho

O texto, fundamentalmente, está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 1 foi elaborado com o intuito de possibilitar um panorama da tese. Faz uma apresentação e mostra como o texto está estruturado. Descreve metas, objetivos e justificativas e, além disso, uma síntese, no âmbito mundial e também nacional sobre a instrumentação Charpy.

No Capítulo 2 foi realizada uma revisão de literatura com o objetivo de apresentar as principais metodologias para determinar o fator de intensidade de tensão dinâmico a partir dos resultados do ensaio Charpy instrumentado. Destacam-se nesse cenário os pesquisadores Ireland, Kalthoff e Kobayashi.

Os materiais e métodos utilizados no trabalho estão descritos no Capítulo 3. O trabalho experimental envolveu três laboratórios de pesquisa. No Laboratório GC3M - Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais DEM/FEIS/UNESP foram realizados os ensaios de impacto e nos Laboratórios de Ensaios Mecânicos e de Metalurgia Física e Solidificação, ambos da Faculdade de Engenharia Mecânica/UNICAMP, foram realizados os ensaios monotônicos e tratamentos térmicos dos corpos de prova.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos do trabalho. Nesse capítulo, além de resultados propriamente do trabalho, foram utilizados também resultados do GC3M. Esse grupo estudou ensaios de impacto em uma máquina Charpy instrumentada reconhecida mundialmente. Os resultados do sistema de instrumentação desenvolvida neste trabalho apresentaram-se próximos dos resultados do grupo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. E, finalizando, o Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas.

1.3. Justificativas e Objetivos

A instrumentação da máquina de ensaio Charpy tem sido alvo há pelo menos 40 anos. Muitos pesquisadores de vários centros de pesquisa do mundo se empenharam, e ainda o fazem, para munir a maquina Charpy de sensores. Todavia, apenas recentemente, no ano 2000, foi apresentada ao meio científico a primeira norma técnica sobre o assunto, a ISO 14.556 "Steel -- Charpy V-notch pendulum impact test -- Instrumented test method".

Tendo em vista a contemporaneidade da divulgação diante da comunidade científica interessada neste assunto, estima-se que poucos pesquisadores, especialmente no Brasil, tenham conhecimento deste documento e tiveram a oportunidade de aplicar e avaliar os procedimentos indicados pela norma. Ainda neste capítulo será apresentado um resumo dos procedimentos estabelecidos pela normatização.

Em um contexto genérico, há no Brasil um número reduzido de máquinas Charpy instrumentadas e de propostas para estudo desses equipamentos. Segundo um levantamento realizado pelo GC3M, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), a Universidade Federal de Minas Gerais, através de um trabalho realizado por Quinan (1996), a Universidade de São Paulo - EESC-USP e a Universidade Estadual Paulista - FEIS-UNESP, através dos trabalhos realizados por Delforge (1994) e pelo GC3M a partir de 1999, possuem máquinas instrumentadas.

Existem no mercado máquinas instrumentadas pelos fabricantes, sobretudo no exterior. A instrumentação, denominada aqui "comercial", traz consigo alguns inconvenientes, como possível falta de especificações e diretrizes estabelecidas pela norma ISO 14.556 e dificuldade no acesso e entendimento detalhado do sistema de aquisição, que representa o cerne da instrumentação Charpy. Portanto, a instrumentação com bases científicas de uma máquina convencional permite o entendimento de todo o sistema de medida, dos transdutores ao tratamento dos sinais obtidos.

Por outro lado, tem sido observado que o interesse em estudar a instrumentação do ensaio Charpy vem decrescendo ao longo dos anos. As empresas prestadoras de serviços e as instituições de pesquisa estão, cada vez mais, na condição de usuários do equipamento do que empenhados na instrumentação, que traz consigo complexidades intrínsecas ao processo. Essas dificuldades são originadas devido ao tipo de carregamento dinâmico aliado à própria estrutura da máquina de ensaio. Ao colidir com o corpo de prova, o martelo pendular produz e transmite ondas internas de choque que são inerentemente captadas pelo elemento sensor.

Enfim, o desenvolvimento de um sistema de medição eficaz que possa ser acoplada a qualquer máquina de ensaio Charpy, sem dúvida, é de enorme valia. O ensaio Charpy instrumentado representa uma ferramenta de grande potencial destinada à caracterização mecânica dos materiais por fornecer uma gama de informações adicionais quando comparado ao ensaio Charpy convencional. Deste modo, centenas de máquinas Charpy existentes no Brasil

podem ser instrumentas e, assim, devido a maior quantidade de informações obtidas, participarem mais ativamente no desenvolvimento e qualificação de novos materiais lançados continuamente no mercado.

O presente trabalho de doutorado trata de uma análise de um sistema de instrumentação desenvolvido com o auxílio de sensores resistivos para máquinas de ensaio de impacto Charpy convencional e da caracterização do fator de intensidade de tensão dinâmico de um aço de ultra-alta resistência largamente aplicado na construção mecânica. Para a caracterização do fator foi analisado a influência de diferentes condições metalúrgicas do aço utilizado obtidas a partir de ciclos térmicos e submetidos aos ensaios mecânicos monotônico e dinâmico.

O sistema completo de instrumentação Charpy foi desenvolvido atendendo os requisitos gerais estabelecidos na norma ISO 14.556. O sistema foi implantado em uma máquina Charpy convencional do Laboratório GC3M – Grupo de Caracterização Mecânica e Microestrutural dos Materiais e o amplificador de sinais desenvolvido pelo Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica. Ambos os laboratórios são da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Os ensaios de impacto instrumentado foram conduzidos em corpos de prova de material ABNT/SAE 4340 com entalhe com raio da ponta do entalhe de 0,25mm e com pré trinca de fadiga sob condições metalúrgicas distintas obtidas a partir de tratamentos térmicos. As condições de tratamento térmico foram como temperado e seguido de revenimento nas temperaturas de 473K, 573K, 673K e 773K.

A caracterização do fator de intensidade de tensão dinâmico foi realizada a partir dos resultados do ensaio de impacto instrumentado em corpos de prova com pré trinca por fadiga. As curvas do ensaio Charpy instrumentado foram tratadas no sentido de eliminar ruídos e ondulações do sinal, em seguida foi aplicado o conceito *Compliance Change Rate* (Taxa da alteração da flexibilidade) proposto por Kobayashi et al. (1993) afim de determinar os esforços envolvidos no processo de fratura.

De posse dos esforços do processo de fratura e o respectivo tempo para ocorrer o esforço, foi utilizado a metodologia da Curva de resposta ao impacto proposto por Kalthoff. Essa curva foi obtida a partir de correlações matemáticas definidas pelo pesquisados e implementada em uma rotina computacional. Assim foi possível determinar o fator de intensidade de tensão dinâmico.

Foram realizados também ensaios de dureza, tração e ensaio de flexão em três pontos em carregamento monotônico, denominado neste trabalho de ensaio monotônico. A partir dos resultados do ensaio monotônico, foi possível determinar o fator de intensidade de tensão e caracterizar os valores dos esforços a partir dos procedimentos estabelecidos na norma ASTM E 399. Estes resultados foram uma referência importante na determinação e análise dos esforços envolvidos no processo de fratura por impacto.

1.4. Ensaio Charpy Instrumentado

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

Ireland (1977) constatou que o sinal obtido pelos extensômetros posicionados no martelo pendular é uma combinação bastante complexa das seguintes componentes: verdadeira resposta do corpo de prova diante da solicitação de impacto, forças inerciais sofridas pela célula de carga provenientes da aceleração do corpo de prova, flutuações de baixa freqüência provenientes das ondas de tensões refletidas e ruídos de alta freqüência causados pelo sistema eletrônico de amplificação, na ausência de filtros.

O pesquisador também propôs um procedimento de teste de impacto instrumentado o qual requeria a três critérios para validar o ensaio. O sinal da força medido durante o ensaio de impacto, utilizando o martelo como elemento transdutor, oscilava sobre a força atual requerida para deformar o corpo de prova. A Figura 1.1 ilustra esquematicamente o fenômeno das oscilações.

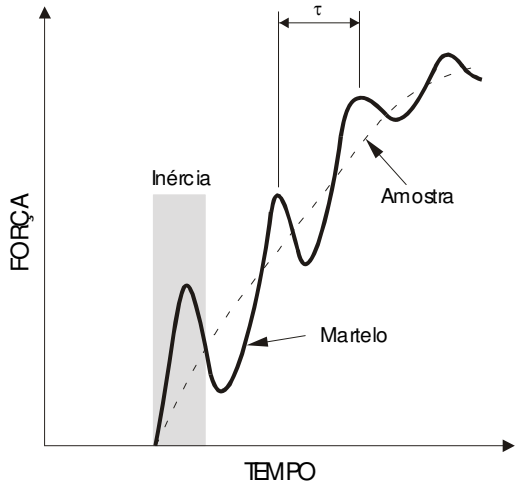


Figura 1.1 - Comparação entre o sinal medido e o sinal esperado.
Fonte: Ireland, (1977).

A força de impacto, como já visto, promove oscilações na força de contato entre o corpo de prova e o martelo pendular, sendo necessário um intervalo de tempo entre 2τ e 3τ para a força ser dissipada, desta forma ficou definido o primeiro critério de validação do ensaio de impacto instrumentado. τ é o período das oscilações e pode ser dado empiricamente pela Equação 1.1 para uma razão de 4 entre o vão, S, da base de apoio e a largura, w, do corpo de prova.

$$\tau = 3{,}36\left(\frac{W}{S_0}\right)\left[EBC_s\right]^{\frac{1}{2}} \tag{1.1}$$

onde, B é a espessura do corpo de prova, E é o módulo de Elasticidade Longitudinal, S_0 é a velocidade do som no corpo de prova e C_s é a flexibilidade do corpo de prova. Assim, τ tem um valor típico de 35μs e 50μs para corpos de prova Charpy e corpos de prova Charpy pré-trincados(a/W=0,5) em aço[1], respectivamente. Quando o tempo t é menor que 2τ, não é possível usar o sinal no martelo para medir a porção da força do corpo de prova causada pelos efeitos inerciais. Uma especificação empírica para a avaliação segura da força e do tempo é:

$$t \geq 3\tau \tag{1.2}$$

O segundo critério de Ireland (1980) relata o problema do potencial da resposta em freqüência do condicionador e amplificador de sinais é evitado especificando-se

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

$$t \geq 1{,}1T_R \tag{1.3}$$

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

$$T_R \geq 1{,}4\tau \tag{1.4}$$

é adequado para o ajuste eletrônico sem que ocorra a alteração global na curva, quando $t < 3\tau$. Quando $t \geq 3\tau$, não há necessidade de se ajustar a curva, pois a disparidade entre a força de contato e a força de deformação do corpo de prova é menor que cerca de 5%. Os requerimentos para se obter uma curva força em função do tempo aceitável, com tempo de impacto adequado tal como ilustra a Equação 1.2, resulta na necessidade de controlar velocidade de impacto, v_0. Controlando a velocidade de impacto, o controle correspondente de E_0 é inerente. A redução da velocidade do martelo durante a força de impacto deve portanto ser minimizada, ou seja:

$$E_0 \geq 3W_M \tag{1.5}$$

onde W_M é a energia dissipada pelo sistema até a força máxima P_M. Esta condição assegura que a velocidade não seja reduzida mais que 20% até a ocorrência da força máxima, assim define-se então o terceiro critério de Ireland. Este requerimento raramente é um problema para ensaios de impacto Charpy-V utilizando o fundo de escala completo da máquina. Assim, os requerimentos para a medição aceitável da força segundo Ireland (1980) são resumidos como segue.

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

Testes efetuados na região inferior da Figura 1.1 enfrentam um problema crucial em medir a força de início de fratura. O valor da força é influenciado pelos efeitos inerciais ou dinâmicos. Quando materiais com fratura frágil são testados em velocidade elevadas podem surgir forças inerciais e o critério 3τ não é satisfeito.

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

A Figura 1.2 ilustra esquematicamente o comportamento das curvas força-tempo como função da temperatura para um aço de média resistência mecânica. Como mostrado nessa figura, a instrumentação permite identificar os vários estágios no processo de fratura. O valor da energia W_M é associado à área sob a curva força-tempo até o carregamento máximo P_M. Este valor de pulso é convertido em energia, aplicando-se a lei do movimento de Newton, que considera a velocidade do pêndulo decrescente durante o processo de deformação e fratura. Esta velocidade decrescente é proporcional à força instantânea aplicada no corpo de prova em qualquer tempo particular (Hertzberg, 1995). A energia absorvida é portanto,

$$\Delta E = E_a \left[1 - \left(\frac{E_a}{4E_0} \right) \right] \tag{1.6}$$

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

$$E_a = V_0 \int_0^{t_i} P dt \tag{1.7}$$

na qual V_0 é a velocidade inicial de impacto e m é a massa do martelo pendular e E_a é a energia para causar a fratura do corpo de prova. A possibilidade de separar a energia total absorvida em

componentes distintas aumenta o número de informações obtidas por meio da instrumentação. As curvas força-tempo-temperatura ilustram os estágios de fratura.

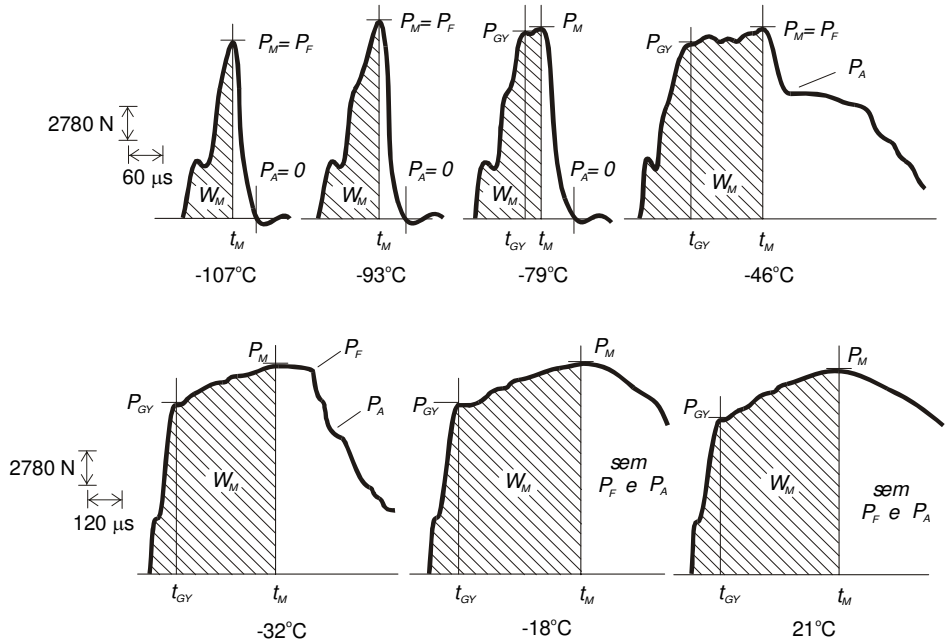


Figura 1.2 - Resposta força - tempo para um aço de média resistência mecânica. (Fonte: Shockey, 1995).

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

Uma pesquisa sobre tenacidade à fratura dinâmica de materiais soldados utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares foi publicada por Schmitt et al. (1994). Nesse estudo, foram realizados estudos por meio de simulação numérica e avaliação da propriedade utilizando corpos de prova com geometria de entalhe lateral. A instrumentação foi fundamentada na colagem de extensômetros no topo do martelo pendular e nos corpos de prova, próximos ao ponto de apoio na máquina de ensaio.

Um outro trabalho, realizado por Aggag e Takahashi (1996), estudou a influência de filtros elétricos e mecânicos aplicados ao ensaio Charpy instrumentado, no intuito de melhorar a

qualidade dos sinais obtidos. Extensômetros elétricos de resistência foram devidamente colados, tanto no martelo pendular como nas proximidades da raiz do entalhe dos corpos de prova. Os filtros mecânicos foram implementados utilizando-se lâminas de borracha de diferentes espessuras e comparou-se os sinais medidos para todos os casos considerados.

Perosanz et al. (1998), apresentou resultados de tenacidade à fratura dinâmica utilizando o ensaio Charpy instrumentado de dois aços: um de uso comum e outro típico de aplicações em vasos de pressão de reatores nucleares. Um novo conceito foi apresentado para obtenção da velocidade e deslocamento do martelo durante o processo de fratura dos corpos de prova. Esse conceito era baseado nas integrações da curva força - tempo considerando a massa do martelo e a lei do movimento de Newton.

Böhme et al. (1999), avaliou e comparou a dispersão dos resultados das medidas de tenacidade à fratura dinâmica e monotônica, medidos em diferentes temperaturas, na região de transição de aços ferríticos utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares. Os ensaios de tração monotônica, dinâmica e Charpy instrumentado também foram comparados.

O efeito da temperatura e da taxa de carregamento na tenacidade à fratura dinâmica de aços estruturais foi estudado por Cun-Jian (1999). Uma máquina de ensaio Charpy instrumentada é utilizada como ferramenta para determinar a tenacidade à fratura dinâmica e estudar as influências dessas variáveis.

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

Delforge (1994), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Ilha Solteira, em conjunto com o Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de Campinas - UNICAMP, por meio de um trabalho de mestrado, promoveu a instrumentação do pêndulo de uma máquina de ensaio Charpy convencional. Utilizando extensômetros elétricos de resistência devidamente fixados no martelo pendular,

foram determinados diversos valores de tenacidade à fratura dinâmica aparente de materiais metálicos, tais como aços ABNT 1020, 4140 e 300M, de qualidade aeronáutica, além da liga de alumínio 7050T76. Diversas taxas de carregamento e temperaturas de ensaio foram efetuados no sentido de avaliar a performance da instrumentação implementada.

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

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

A Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - USP, adquiriu no final de 2000, pelo Departamento de Engenharia de Materiais, uma máquina de ensaio Charpy instrumentada da marca *Instron Wolpert*. A instrumentação, por extensômetros elétricos, posiciona-se no cutelo do martelo pendular. A aquisição e o tratamento dos sinais são efetuados por pacote computacional confeccionado pela *National Instruments*, adquirido em conjunto com a máquina.

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

máquina de ensaio Charpy convencional com capacidade de 490J com velocidade de impacto de 5m/s e uma máquina servo-hidraúlica com capacidade de 45kN e velocidade de carregamento de 0,01 a 12m/s. Os resultados apresentados revelaram que as taxas de deformação para os corpos de prova Charpy-V ensaiados a 5m/s correspondem a corpos de prova de ensaio de tração por impacto ensaiados à 7m/s. A Figura 1.3 representa a tensão de escoamento e a tensão de resistência obtidas pelo ensaio Charpy e ensaio de tensão por impacto à 7m/s para ligas de alumínio.

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

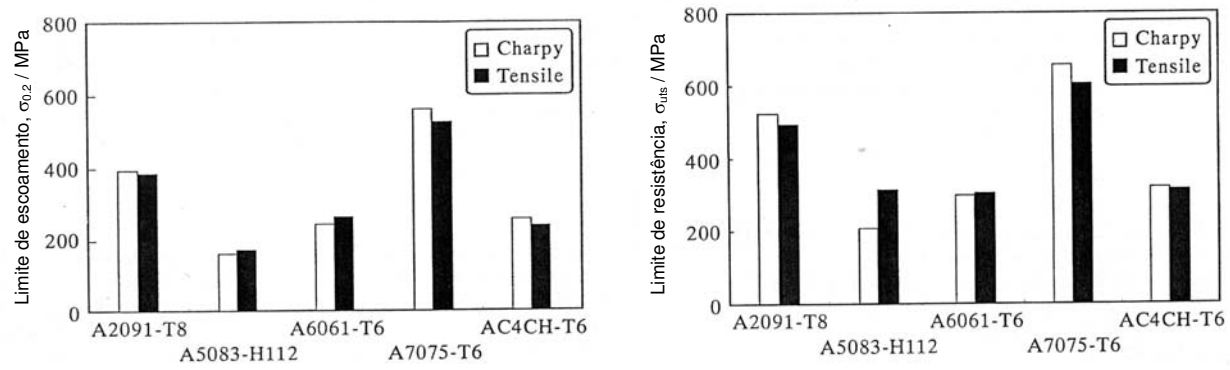


Figura 1.3 – Comparação da resistência obtida pelo ensaio de tensão por impacto e ensaio Charpy-V.
Fonte: Kobayashi et al., 2001.

Manahan et al. (2001) relata que a aplicação de encoders ópticos na medida da energia de impacto Charpy aumentou significativamente a precisão da determinação da energia lida no indicador da máquina. Segundo o pesquisador, os martelos instrumentados constituem um método alternativo de medida de energia, que é acurado e reproduzível para ensaios tanto com corpo de prova convencional como em miniatura, enquanto fornecem informações úteis, tais como carregamento geral produzido, carga máxima, carga de fratura frágil, e carga obtida para fratura frágil. Tem-se observado que a energia total absorvida medida usando estas duas tecnologias geralmente apresenta-se em acordo, mas as vezes difere por uma quantidade significante. A energia total absorvida do martelo instrumentado tem sido maior ou menor do que

a energia medida pelo encoder óptico dependendo da ductilidade dos corpos de prova entre outros fatores.

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

Tronskar et al. (2001) apresentou um estudo que apontava o desenvolvimento de um método para a medida direta da curva força-deslocamento durante o ensaio de impacto Charpy. O método envolve a medida direta do deslocamento usando um interferômetro a laser em adição com a curva força-deslocamento, derivada do sinal de força por dupla integração de acordo com os procedimentos normalizados. A extremidade do cutelo ISO foi instrumentada com um sensor piezoelétrico e o sistema é calibrado na própria máquina de impacto como recomendado pela norma ISO 14.556 (2000), usando uma célula de carga de acuracidade 0,5% e um sistema de prensa hidráulica. A Figura 1.4 apresenta os resultados de Tronskar.

Aproveitando o mesmo sistema de medida entregue no trabalho passado, Tronskar e Mannan et al., estudaram em outro trabalho a correlação entre resistência à trinca medida em condições dinâmicas, baseados nos dados do ensaio Charpy-V instrumentado, e em condições quasi-estático, baseados nos resultados dos ensaios *J-R* e utilizaram a Taxa de Alteração de Compliance de Yamamoto et al. (1993).

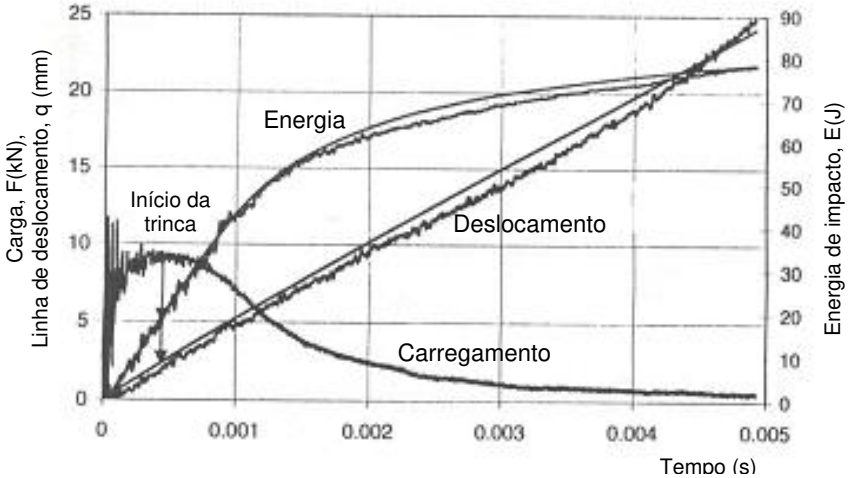


Figura 1.4(a) – Carga, deslocamento e energias contra o tempo para um CDP pré-trincado ensaiado a +23º C. A energia de impacto mostrada no dial foi de 76 J.

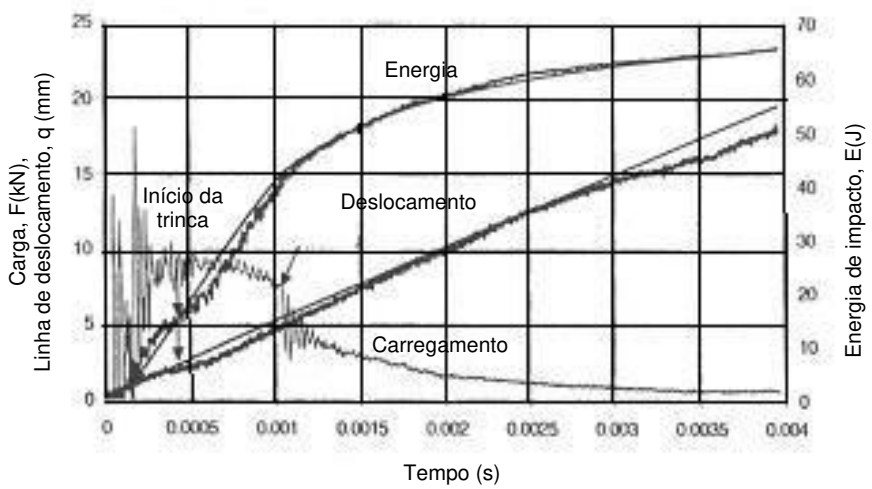


Figura 1.4(b) – Carga, deslocamento e energias contra o tempo para um CDP pré-trincado ensaiado a 0º C. A energia de impacto mostrada no dial foi de 68 J.

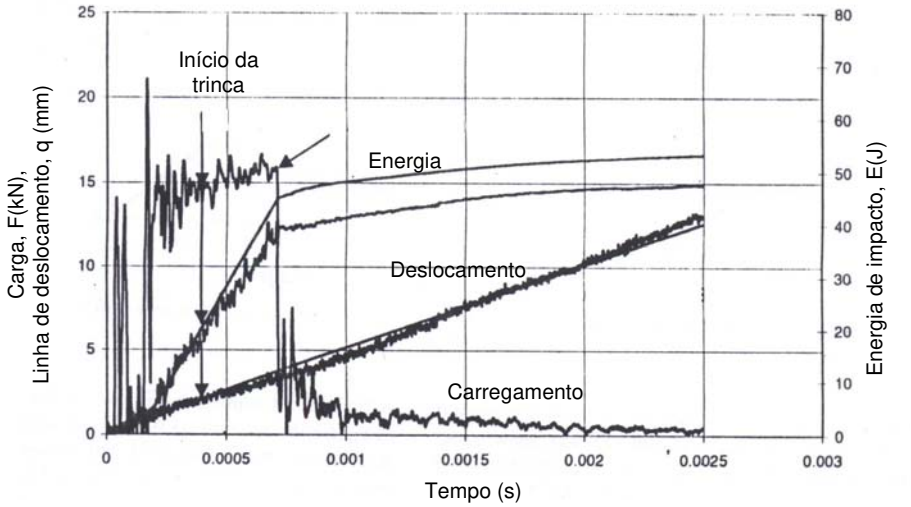


Figura 1.4(c) – Carregamento, deslocamento e energias plotadas contra o tempo para um CDP Charpy com entalhe em V ensaiado à temperatura de –40ºC. A energia de impacto mostrada era de 57J.

Figura 1.4 – Curvas Carregamento - Deslocamento - Energia absorvida para diferentes temperaturas utilizando laser (transdutor de deslocamento). Fonte: Tronskar, (2001).

Fernández et al. (2002) apresentou um trabalho da medida da tenacidade a fratura dinâmica em compósitos a partir do ensaio Charpy instrumentado. Alterações na velocidade de impacto e no comprimento da trinca foram parâmetros investigados na tenacidade à fratura dinâmica. Neste estudo Fernández mostra a diferença entre o comportamento frágil e dúctil de duas curvas idealizadas do ensaio Charpy instrumentado. A Figura 1.5 mostra as curvas idealizadas.

1.5. Especificação do Sistema de Medida segundo a norma ISO 14.556 (2000)

Esta Padronização Internacional, ISO 14.556 (2000), especifica um método de instrumentação do ensaio de impacto Charpy em um corpo de prova de aço com entalhe - V e as

exigências a respeito das medidas e sistema de aquisição e tratamento de dados. Permite aplicá-la em materiais metálicos fornecendo informações sobre o comportamento em fratura dos produtos ensaiados. Estão vinculadas a esta norma as seguintes normatizações: ISO 148.1 – Charpy Pendulum impact Test – Part 1: Test Method e ISO 148.2 – Charpy Pendulum impact Test – Part 2: Verification of Test machines. Com a finalidade de padronização internacional, a norma define critérios para instrumentação, para calibração do sistema de medida e classificação da curva quanto ao comportamento mecânico.

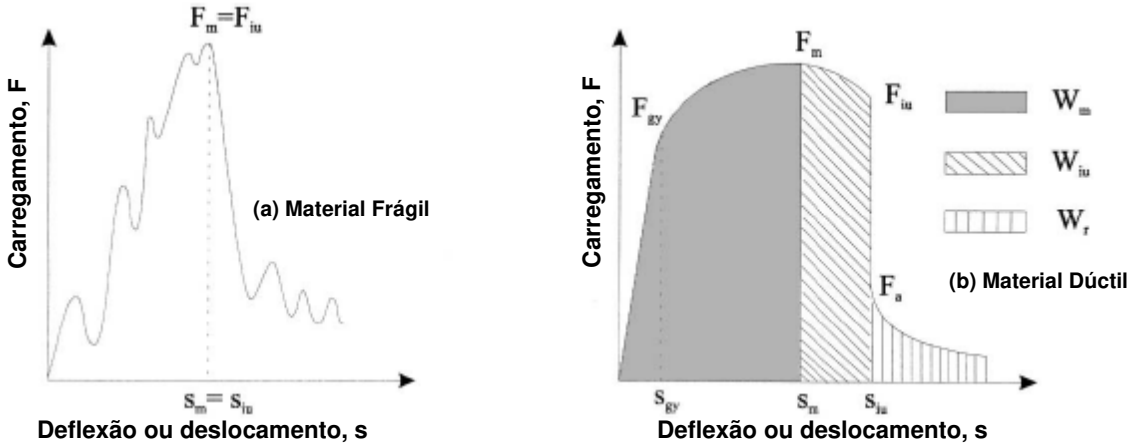


Figura 1.5 – Curvas idealizadas do ensaio Charpy instrumentado.
Fonte: Fernández et al. (2002).

Um critério, muito utilizado neste trabalho, é possibilidade de se fazer comparações entre a energia total de impacto instrumentado calculado a partir das equações 1.8 e 1.9, e a energia absorvida indicada pelo relógio mostrador da máquina. A norma estabelece que, se as divergências entre os valores lidos na máquina e os valores calculados excederem ± 5J, deve ser investigado:

a) o atrito do sistema mecânico da máquina;

b) a calibração do sistema de medidas;

c) o programa utilizado.

A norma define também um procedimento de instrumentação que possibilita a utilização de extensômetros elétricos de resistência para a medição de força durante o impacto. Assim, a utilização de dois extensômetros no cutelo e outros dois em uma peça para compensação dos efeitos de vibração e temperatura permite a formação uma ponte completa. O sistema de medida de força durante o impacto é composto de um cutelo instrumentado, amplificador, sistema de

aquisição e tratamento de dados. Este sistema deve ter uma resposta em freqüência de pelo menos 100kHz, que corresponde ao tempo de subida de não mais que 3,5μs.

A norma destaca também a calibração do sistema de aquisição de dados. Conforme o procedimento da norma, a calibração do sistema deve ser realizada estaticamente, de acordo com a acuracidade requerida. É fundamental que a força de calibração seja aplicada feita no cutelo instalado dentro do conjunto do martelo. É definido a utilização de um bloco suporte semelhante às características dimensionais de uma corpo de prova Charpy V com elevada dureza.

O sinal provido do cutelo instrumentado é do tipo transiente, assim a norma sugere a utilização de um sistema de gravação da curva força em função do tempo com armazenagem digital, contendo interface eletrônica para tratamentos dos dados via computador e conversor analógico-digital de no mínimo 8 bits, com uma taxa de amostragem de 250kHz.

Além do valor de força durante o impacto, o deslocamento do corpo de prova pode ser medido diretamente no ensaio. Umas das técnicas utilizadas por vários é o emprego de enconders ópticos instalados no eixo do martelo pendular. Porém, se o deslocamento do martelo não puder ser medido diretamente no ensaio, é possível determinar a curva força em função do deslocamento equivalente. A relação força em função do tempo é proporcional à aceleração característica ocorrida no ensaio. Assumindo o pêndulo como um elemento suficientemente rígido de massa m, o deslocamento é obtido numericamente da seguinte forma:

$$V(t) = V_0 - \frac{1}{m}\int_{t_0}^{t} F(t)\,dt \tag{1.8}$$

e,

$$S(t) = \int_{t_0}^{t} V(t)\,dt \tag{1.9}$$

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

Esta norma consolidou muitos estudos na área de instrumentação e permitiu medir dois componentes envolvidos no processo de fratura por impacto: energia e força aplicada por todo o evento da fratura. Cabe ressaltar que, esta norma não estabelece metodologias para se determinar esforços envolvidos no escoamento generalizado ou na iniciação da trinca nas quais são propriedades mecânicas fundamentais para o entendimento de fatores de intensificação de tensão dinâmico. Algumas técnicas aplicadas aos resultados obtidos do ensaio Charpy instrumentado para determinar propriedades mecânicas são apresentados no capítulo a seguir.

Capítulo 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Considerações iniciais

Por volta do ano de 1950, a Mecânica de Fratura começou ser aplicada nos materiais metálicos. Até então, a filosofia de projeto era baseada nos conceitos de tensão e deformação e recomendava que componentes trincados deveriam ser imediatamente reparados ou retirados de operação. Esta abordagem tem sido razoavelmente eficaz na prevenção da fratura catastrófica, entretanto, a necessidade crescente de se utilizar forma racional dos recursos tem forçado o emprego da metodologia da Mecânica de Fratura em componentes mecânicos, principalmente em termos de otimização das propriedades mecânicas tenacidade à fratura e resistência mecânica.

O custo para se recuperar ou substituir um componente trincado deve, desta forma, ser contrabalançado com a possibilidade do componente continuar em serviço e acabar conduzindo a uma falha. Este conceito de engenharia, denominado de dano tolerado, tem sido continuamente desenvolvido com o intuito de se conceber um guia quantitativo para orientar as ações. Esta nova metodologia de projeto se fundamenta nos princípios abstraídos da Mecânica de Fratura. Ainda que a Mecânica de Fratura não seja o único ingrediente para assegurar a integridade estrutural, sem dúvida ela desempenha o papel central.

A metodologia de projeto, baseado no conceito de dano tolerado, é principalmente empregada pelas indústrias de veículos aeronáuticos e aeroespaciais e indústria nuclear. São três fatores que têm fortalecido a aplicação do conceito de dano tolerado:

- A presença de uma trinca não necessariamente desqualifica determinados componentes estruturais. Ou seja, não significa que a vida útil desses componentes chegou ao fim;
- A melhoria da sensibilidade dos ensaios não destrutivos tem a possibilidade de detectar defeitos cada vez menores no interior dos componentes estruturais;
- O desenvolvimento de métodos quantitativos, de satisfatória acuracidade, baseados na Mecânica de Fratura, permitem estimar o tamanho de trinca tolerado de modo a garantir a integridade estrutural, sob qualquer forma de carregamento.

Na sua forma mais básica, a Mecânica de Fratura é empregada para determinar qual a carga máxima de operação segura, que uma estrutura de engenharia pode ser submetida, em função da localização e tamanho de uma trinca, determinar qual o maior tamanho de trinca que pode ser admitido, sem que ocorra fratura, para uma dada carga aplicada e determinar a taxa de crescimento de uma trinca de tamanho benigno até uma condição crítica.

A trinca é uma descontinuidade geométrica que introduz uma distribuição de tensão não uniforme nas proximidades da sua raiz, alcançando valores elevados nas arestas diminuindo rapidamente à medida que se distância destas. Esta concentração de tensão é expressa por um fator de intensidade de tensão, K, que, ao alcançar o valor crítico ocorre a fratura instável ou catastrófica. O valor crítico do fator de intensidade de tensão é conhecido como tenacidade à fratura do material. A tenacidade à fratura pode ser considerada o valor limite de intensidade de tensão.

Em 1970 foi publicada a primeira norma, ASTM E 399, que consolidava os procedimentos experimentais para determinação da tenacidade à fratura em condições de deformação plana. O ensaio é realizado em um corpo de prova com uma pré trinca de fadiga, com carregamento monotônico e com uma taxa de aumento do fator de intensidade de tensão entre 0,5 e 3,0 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}/\mathrm{s}$. Esta taxa de aumento do fator de intensidade de tensão no ensaio monotônico é considerada muito baixa diante de um ensaio dinâmico. Por hora o problema de componentes mecânicos trincados sob carregamentos monotônicos estava resolvido. Entretanto, a aplicação do fator de intensidade de tensão em componentes submetidos a esforços dinâmicos ainda era incipiente.

2.2. O fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id}

Os reatores nucleares são exemplos de equipamentos que operam sob condições dinâmicas e apresentam uma fragilização durante o período de operação. Esses equipamentos sofrem a fragilização do material por radiação que por sua vez geram trincas e, além disso, podem apresentar em operação a necessidade de um resfriamento rápido e assim causar gradientes de temperatura elevado.

No sentido de incorporar os efeitos dinâmicos no fator de intensidade de tensão monotônico, o código de projeto para reatores nucleares, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 3, apresentou a correlação entre a energia global absorvida no ensaio de Charpy e a tenacidade à fratura proposta por Barson (1975). Essa correlação está descrita na Equação 2.1.

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 5\left[\frac{E_D}{\sigma_y} - 0{,}05\right] \tag{2.1}$$

na qual, E_D é a energia global em *ft.lbf*, σ_y é o limite de escoamento em *ksi* e K_{IC} é a tenacidade à fratura em $ksi\sqrt{in}$. Fica evidente que qualquer correlação aplicando a energia global não considera os possíveis efeitos do carregamento dinâmico na iniciação e na taxa de crescimento da trinca. Esta correlação também possui uma particularidade, só pode ser aplicada em condições microestruturais que apresentaram 100% de fratura por cisalhamento.

Barson e Rolfe (1979) propuseram também uma correlação entre a energia global absorvida no ensaio de impacto e a tenacidade à fratura, K_{IC}. Essa correlação era aplicada somente na região de transição entre a fratura frágil e dútil do gráfico energia global absorvida em função da temperaatura. A correlação é descrita a na Equação 2.2:

$$\frac{K_{IC}{}^2}{E} = 2\sqrt{(E_D)^3} \tag{2.2}$$

na qual, E_D é a energia global em *ft.lbf*, E é o módulo de elasticidade em *psi*, e K_{IC} é a tenacidade à fratura em $psi\sqrt{in}$.

As correlações com a energia global se entenderam também para o fator de intensidade de tensão dinâmico. Os pesquisadores como Barsom (1975), Sailors e Corten (1972) sugeriram aproximações numéricas para o cálculo da tenacidade à fratura dinâmica. Estas aproximações foram publicadas no ASM Handbook, Mechanical Testing, 9ª edição. As correlações são descritas a seguir nas equações 4.4 e 4.5.

$$\frac{K_{Id}^{\ 2}}{E} = 5E_D \quad \text{(Barsom, 1975)} \tag{2.3}$$

na qual, E_D é a energia global em *ft.lbf*, E é o módulo de elasticidade em *psi*, e K_{IC} é a tenacidade à fratura em $psi\sqrt{in}$.

$$K_{Id}^{\ 2} = 15{,}873\sqrt[8]{E_D^{\ 3}} \quad \text{(Sailors e Corten, 1972)} \tag{2.4}$$

na qual, E_D é a energia global em *ft.lbf* e K_{IC} é a tenacidade à fratura em $ksi\sqrt{in}$.

Os resultados obtidos por correlações matemáticas baseadas no resultado de energia global absorvida são demasiadamente simplistas e inadequados para a aplicação em componentes sujeitos a carregamentos dinâmicos. Pesquisadores como Kalthoff (1985) e Kobayashi et al. (1993), propuseram ferramentas capazes de gerar resultados do fator de intensidade de tensão dinâmico para aplicação em engenharia. Os pesquisadores avaliaram o fator de intensidade de tensão dinâmico em corpos de prova com pré trinca a partir de máquinas de ensaio de impacto convencional munidas de um sistema de instrumentação.

Kalthoff utilizou o sinal provido do extensômetro calibrado para obter o fator de intensidade de tensão, assumindo uma distribuição de deformação semelhante ao ensaio monotônico ou então, realizando uma análise dinâmica por elementos finitos para uma determinada geometria do corpo de prova e localização da medida. O posicionamento do extensômetro próximo à ponta da trinca tem vantagens quando fratura é principalmente elástica porque a deformação elástica local aumenta quase linearmente com o aumento do valor de tenacidade.

Outras técnicas acopladas aos extensômetros foram utilizadas. O método da sombra óptica também desenvolvida por Ka1thoff (1985), reflete uma faixa de luz formada na ponta do entalhe quando o corpo de prova é solicitado. Isto produz uma imagem por meio da sombra que pode ser fotografada por uma máquina fotográfica de alta velocidade. O tamanho da imagem está relacionado diretamente com o fator de intensidade de tensão na ponta da trinca. Esta técnica é utilizada para revelar a curva de resposta ao impacto no comportamento elástico linear, característico para qualquer combinação geometria/material a ser ensaiado. Nesta metodologia, somente uma medida do tempo para fratura, t_f, é requerida.

Além desta técnica, Böhme e Kalthoff (1985), utilizaram sensores magnéticos próximos e sem contato da ponta da trinca. Esta metodologia necessitava apenas da magnetização do corpo de prova antes do ensaio. Estas metodologias desenvolvidas por Kalthoff e Böhme contribuíram significativamente para a análise da tenacidade à fratura dinâmica e atualmente são empregadas no sistema de análise de sinais de máquinas de ensaio de impacto instrumentadas comerciais. Em seguida são apresentados os procedimentos desenvolvidos pelos pesquisadores.

2.3. Avaliação da Tenacidade à Fratura Dinâmica proposta por Kalthoff e Böhme

Os efeitos inerciais podem causar influência no comportamento do corpo de prova entalhado submetido a carregamento de impacto em flexão (Kalthoff e Böhme, 1982). Testes de impacto instrumentado com corpos de prova entalhados são freqüentemente utilizados para medir a tenacidade à fratura ao impacto K_{Id} dos materiais (Kalthoff, Winkler e Böhme, 1985). Neste ensaio, uma massa é liberada de uma altura conhecida e, em movimento pendular, atinge o corpo de prova na condição de flexão em três pontos e o força é monitorada em função do tempo por sensores resistivos ou piezoelétricos acoplados especialmente na massa do pêndulo. Esta técnica de avaliação da tenacidade à fratura só é valida se a fratura em condições dinâmicas ocorrer em um tempo muito menor se comparado em condições estáticas ensaiadas. Kalthoff, Winkler e Böhme (1985) citam que o método proposto pela ASTM assume que a condição é aceita quando o tempo para fratura, t_f, do corpo de prova for tão maior que os três tempos do período de oscilação, τ, do corpo de prova após o impacto:

$$t_f > 3\tau \tag{2.5}$$

onde τ=45 a 60μs, dependendo do comprimento da trinca. A condição da Equação 2.5 restringe uma faixa de aplicabilidade do teste: tempo para fratura suficientemente grande são somente alcançados se a ductilidade do material e a temperatura do ensaio forem elevadas e/ou se a velocidade de impacto for suficientemente baixa.

Dificuldades estão inerentes com este procedimento de medida e avaliação: primeiro, devido à oscilação da componente força capturada e geralmente causam incertezas na determinação do ponto real de fratura, e segundo, devido ao valor de resistência dinâmica do material ser deduzido a partir de analises estáticas de carregamento (Kalthoff, Winkler e Böhme, 1985).

O ensaio em flexão é largamente utilizado para determinar a tenacidade à fratura tanto em carregamento estático como em condições dinâmicas de carregamento (Kalthoff e Böhme, 1985). Em condições estáticas de ensaio, a relação entre a força aplicada no corpo de prova, a geometria do corpo de prova, e o fator de intensidade de tensão, K_I, geralmente são bem conhecidos. Esta relação não pode ser observada para condições dinâmicas de ensaio, pois existem os efeitos dinâmicos. A proporcionalidade entre a força aplicada, P(t), e o estado de tensão na ponta do trinca, K_I^{dyn}, torna o fator tempo, dependente (Kalthoff e Böhme, 1985).

Diante da proporcionalidade entre a força aplicada, estado de tensão dinâmico na ponta da trinca e tempo de fratura, os pesquisadores Kalthoff, Winkler e Böhme (1985) desenvolveram metodologias para determinar as três propriedades e assim estabelecer a tenacidade à fratura dinâmica e quantificar os efeitos dinâmicos do ensaio de impacto.

Os pesquisadores utilizaram extensômetros elétricos no martelo pendular posicionados próximos a região de impacto, além de extensômetros posicionados no corpo de prova e um sensor magnético como forma de instrumentação do ensaio. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente a metodologia empregada.

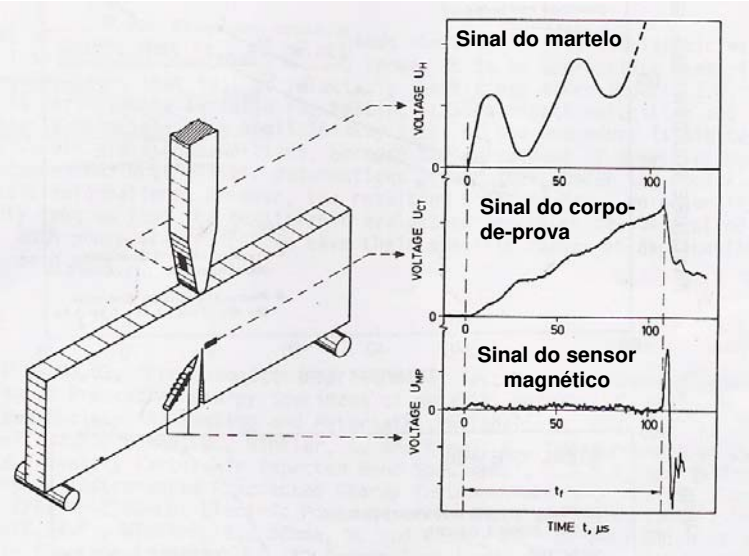


Figura 2.1 – Representação esquemática da metodologia empregada por Kalthoff et al.
Fonte: Kalthoff, Winkler e Böhme, (1985).

Segundo Kalthoff, Winkler e Böhme (1985), em condições de ensaio estabelecidas, como geometria do corpo de prova e velocidade de impacto, o comportamento do estado de tensão dinâmico na ponta do trinca, $K_I^{dyn}(t)$, é estabelecido conforme o processo específico de impacto considerado e está relacionado à resposta do corpo de prova ao impacto, chamado de *"Impact Response Curve"*, denominada neste trabalho de *curva de resposta ao impacto* ou *CRI*. A curva *CRI* depende somente da reação elástica do sistema corpo de prova/martelo. A seguir é apresentado os conceitos e fundamentos da curva de resposta ao impacto.

Diante das propriedades estabelecidas, o valor da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id}, é obtido a partir da curva de resposta ao impacto preestabelecida e a medida do tempo para fratura, t_f, utilizando a Equação 2.6 proposta por Kalthoff, Winkler e Böhme (1985). A Figura 2.2 mostra a localidade do valor de K_{Id} na curva *CRI*.

$$K_{Id} = K_I^{dyn}\left(t = t_f\right) \tag{2.6}$$

- ***Fundamentos da Curva de Resposta ao Impacto***

A curva de resposta ao impacto pode ser medida ou calculada. Cálculos numéricos geralmente requerem considerações do corpo de prova e do martelo. Esforços numéricos estão consideravelmente reduzidos se dados experimentais, como a força ou o deslocamento medido,

forem utilizados no cálculo numérico. Esforços para estabelecer relações numéricas que quantificam a resposta de corpo de prova durante o processo de impacto foram empreendidos por vários pesquisadores. Técnicas experimentais baseadas em métodos ópticos, por exemplo, a técnica de fotoelasticidade de faixas isocromáticas e o método da sombra óptica, são aplicáveis, mas, preferivelmente são utilizadas em corpos de prova maiores que os corpos de prova Charpy (Kalthoff, Winkler e Böhme, 1985).

A instrumentação aplicada próxima à ponta do entalhe no corpo de prova Charpy provê o modo mais simples para estabelecer as curvas de resposta de impacto com corpos de prova Charpy pré-trincados. Em experimento estático, o sinal obtido de um extensômetro posicionado próximo à ponta do trinca é calibrado em termos do fator de intensidade de tensão. Devido ao extensômetro estar posicionado próximo à ponta do trinca, pode se assumir que o sinal provido do extensômetro durante o impacto representa uma boa medida do fator de intensidade de tensão na ponta do entalhe (Kalthoff, Winkler e Böhme, 1985).

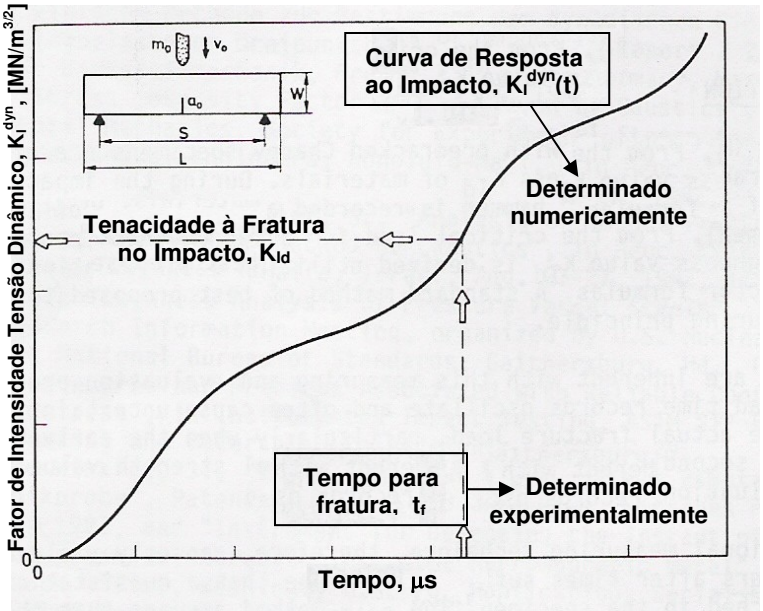


Figura 2.2 – Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica, K_{Id}, a partir da Curva de Resposta ao Impacto.
Fonte: Kalthoff, Winkler e Böhme, (1985).

A Figura 2.3 ilustra as curvas de resposta ao impacto para corpos de prova Charpy em aço com comprimento de trinca inicial de a=5mm, ensaiados em velocidades de impacto diferentes de Vo=2; 3,8; e 5m/s. Os dados foram obtidos com uma máquina pendular de 300J e flexibilidade

Cm=8,1*10^{-9}m/N. Os extensômetros foram posicionados aproximadamente 2mm ao lado da ponta do entalhe.

Segundo Kalthoff, Winkler e Böhme (1985) as curvas de resposta ao impacto para velocidades de impacto diferentes são semelhantes. O fator de intensidade tensão K_I^{dyn} dependem linearmente da velocidade de impacto v_o. A curva de resposta ao impacto pode ser representada por uma relação. Pode ser notado na Figura 2.3 que esta relação pode ser matematicamente descrita por uma linearidade do fator *K* com o tempo com correções dinâmicas sobrepostas. Esta relação difere com o comprimento do entalhe, mas para pequenas variações no comprimento do entalhe utilizado em corpos de prova em flexão (0,45<*a*/*W*<0,55 recomendado pela ASTM E 399), as diferenças resultantes são modestas e podem ser compensadas por um modo aproximado.

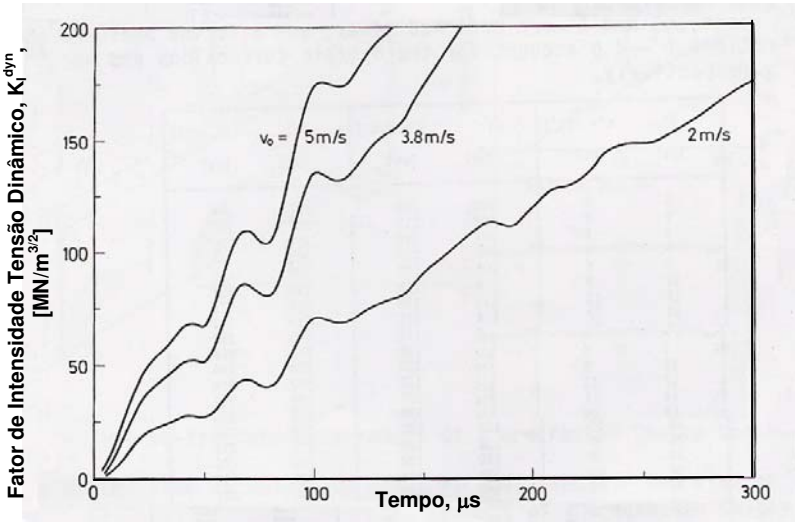


Figura 2.3 – Curva de Resposta ao Impacto para corpos de prova Charpy pré-trincados ensaiados em diferentes velocidades de impacto. Fonte: Kalthoff, Winkler e Böhme (1985).

Para aplicações práticas, é recomendado utilizar a expressão,

$$K_I^{dyn} = R * v_o * t'' \tag{2.7}$$

onde, $t'' = f(t')$ dado pela Tabela 2.1 e,

$$t' = g(t) = t\left\{1 - 0{,}62\left(\frac{a}{W} - 0{,}5\right) + 4{,}8\left(\frac{a}{W} - 0{,}5\right)^2\right\}$$

onde R=301GN/m$^{5/2}$**,** v_o é a velocidade de impacto, a é o comprimento do entalhe, w é largura do corpo de prova, t' e t'' são tempos modificados, e t é tempo ensaiado medido. A Tabela 2.1 apresenta as funções f e g para correções e variações dinâmicas do comprimento da trinca.

*****Obs.: O valor de R considerado, difere conforme a flexibilidade da máquina de ensaio. Neste caso, a flexibilidade da máquina C_m=8,1*10^{-9}m/N. Em caso de flexibilidade diferentes, Multiplica-se o valor de R pela equação $\frac{1{,}276}{1+0{,}276*\frac{C_m}{8{,}1*10^{-9}}}$. Segundo Ireland (1977), A faixa de valores da flexibilidade varia de (0,86 a 1,14)*10^{-9}*m/N*, além disso, ele apresenta outras metodologias para determinar a flexibilidade da máquina.

- ***Medições do tempo para Fratura***

Foi definido que a tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id}, calculada a partir da Equação 2.6, estava relacionada ao tempo de fratura do corpo de prova. Assim os pesquisadores conheceram a tempo de fratura envolvido a partir de extensômetros elétricos e um sensor magnético. A técnica consistiu em obter um sinal provido de extensômetros locados no martelo, sem a necessidade de calibrá-los, em obter o sinal provido de um extensômetro posicionado próximo à ponta da trinca do corpo de prova e em obter o sinal provido do sensor magnético.

O sinal do martelo instrumentado marcava o início do impacto. O sinal registrado pelo extensômetro no corpo de prova tinha como característica um decremento acentuado no momento da fratura. A Figura 2.1 ilustra este momento. O tempo para fratura, t_f, é o intervalo entre os dois sinais. Em adição a esta técnica, os pesquisadores implementaram um sensor magnético próximo ao entalhe. Nesta metodologia o corpo de prova era magnetizado, para que no momento da instabilidade do entalhe, gerasse um campo magnético que pudesse ser captado pelo sensor. A Figura 2.1 mostra o momento quando ocorre a fratura com o sensor magnético.

- ***Considerações quase-estáticas e quantificação dos efeitos dinâmicos***

Uma aproximação analítica-experimental foi desenvolvida por Böhme e Kalthoff (1985) para monitorar o carregamento dinâmico na ponta da trinca. Esta metodologia divide-se em duas partes: primeiro, uma estimativa grosseira do carregamento total na ponta da trinca, $K_I^{q.s.}(t)$, obtido a partir de considerações quase-estáticas. Segundo, a função correção, $k^{dyn}(t)$, determinado

experimentalmente, o qual quantitativamente descreve os efeitos dinâmicos. A combinação destes parâmetros permite uma predição quantitativa do fator de intensidade tensão, $K_I^{dyn}(t)$, pela relação:

$$K_I^{dyn}(t) = K_I^{q.s.}(t) * k^{dyn} \tag{2.8}$$

Tabela 2.1 – Valores das funções f e g para correções e variações dinâmicas do comprimento da trinca
Fonte: Kalthoff, Winkler e Böhme (1985).

t' $[\mu s]$	$t''=f(t')$ $[\mu s]$	t' $[\mu s]$	$t''=f(t')$ $[\mu s]$	t' $[\mu s]$	$t''=f(t')$ $[\mu s]$
0	0	100	118	200	198
2	0	102	119	202	202
4	2	104	118	204	204
6	4	106	117	206	207
8	6	108	115	208	210
10	9	110	115	210	212
12	13	112	115	212	212
14	17	114	115	214	213
16	20	116	116	216	213
18	24	118	118	218	214
20	28	120	120	220	216
22	30	122	122	222	219
24	33	124	124	224	222
26	35	126	126	226	225
28	36	128	128	228	230
30	38	130	129	230	233
32	39	132	130	232	236
34	40	134	131	234	239
36	42	136	132	236	241
38	43	138	134	238	243
40	45	140	136	240	244
42	46	142	138	242	245
44	47	144	141	244	245
46	46	146	145	246	245
48	45	148	148	248	245
50	45	150	152	250	245
52	46	152	155	252	245
54	49	154	157	254	245
56	53	156	159	256	246
58	57	158	161	258	249
60	61	160	164	260	251
62	65	162	166	262	253
64	69	164	169	264	255
66	72	166	172	266	257
68	73	168	175	268	258
70	73	170	177	270	260
72	72	172	180	272	261
74	70	174	183	274	262
76	69	176	185	276	265
78	68	178	187	278	267
80	69	180	188	280	269
82	70	182	188	282	272
84	75	184	187	284	275
86	81	186	186	286	277
88	88	188	185	288	280
90	94	190	186	290	282
92	100	192	187	292	284
94	106	194	189	294	286
96	111	196	192	296	288
98	116	198	195	298	289

O comportamento da trinca é determinado pelo deslocamento do corpo de prova em função do tempo e por vários parâmetros: massa do martelo M, velocidade de impacto v_o, flexibilidade da máquina C_m, largura do corpo de prova w, comprimento do corpo de prova L, espessura B, comprimento do entalhe a, flexibilidade do corpo de prova C_s, Módulo de Young E, coeficiente de Poisson ν, densidade de massa ρ e comprimento do vão S. Utilizando correlações estáticas de flexão em três pontos, o deslocamento pode ser expresso em termos de fatores de intensidade de tensão, $K_I^{q.s.}$,

$$K_I^{q.s.}(t) = v_o * Y \sqrt{\frac{E*M}{W*B*C_s^*}} \sin\left(\sqrt{\frac{E*B}{M*C_z^*}}\right) \tag{2.9}$$

onde $C_m << C_s^*$ e $S/W=4$. A função $Y=Y(a/W)$ é a relação estática para determinar K_I com corpos de prova em flexão em três pontos,

$$Y\left(\frac{a}{W}\right) = 6* \frac{\sqrt{\frac{a}{W}}\left[1{,}99 - \frac{a}{W}\left(1-\frac{a}{W}\right)\left(2{,}15 - 3{,}93\frac{a}{W} + 2{,}7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{\left(1+2\frac{a}{W}\right)\sqrt{\left(1-\frac{a}{W}\right)^3}} \tag{2.10}$$

$C_s=C_s^*(a/W)=C_s/EB$ é a flexibilidade do corpo de prova em tensão plana,

$$C_s^* = 19{,}1\left(1+0{,}17\upsilon\right) + 135\left(\frac{a}{W}\right)^2 \left[\begin{array}{l} 1 - 2{,}11\left(\frac{a}{W}\right) + 8{,}76\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 19{,}9\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 41{,}4\left(\frac{a}{W}\right)^4 - \\ -67{,}7\left(\frac{a}{W}\right)^5 + 92{,}1\left(\frac{a}{W}\right)^6 - 76{,}7\left(\frac{a}{W}\right)^7 + 35{,}6\left(\frac{a}{W}\right)^8 \end{array}\right] \tag{2.11}$$

A flexibilidade da máquina, C_m, pode ser facilmente admitida na Equação 2.11 substituindo C_s^* por $C_s^*(1+C_m/C_s)$. A Equação 2.10 apresenta uma primeira avaliação do comportamento global da trinca e a dependência dos parâmetros de testes, como ilustrado na Figura 2.4. Somente a primeira metade do período da função seno (Equação 2.9) é apresentada. Este intervalo é de interesse nos testes de impacto, desde que os corpos de prova rompem na primeira metade da curva de carregamento senoidal. Na máxima energia cinética do martelo teria sido completamente convertida em energia de deformação do corpo de prova. Os resultados são apresentados em uma forma normalizada. Todas as curvas correspondem a parâmetros de teste

fixos. Para valores baixos/altos dos parâmetros de teste, o comportamento do entalhe é determinado pelas curvas pontilhadas/traçadas. As setas indicam as mudanças obtidas aumentando o parâmetro de teste.

Duas observações interessantes devem ser enfatizadas: primeiro, $K_I^{q.s.}(t)$ é independente da massa de martelo, M, e da espessura do corpo de prova, B. Segundo, $K_I^{q.s.}(t)$ varia muito pouco com comprimento do entalhe, a/W, para $0{,}2 \leq a/W \leq 0{,}5$. Somente para entalhes maiores ou menores que o intervalo, a inclinação da curva $K_I^{q.s.}(t)$ é alterada.

Böhme e Kalthoff (1985), para examinar a acuracidade da aproximação calculada e descrita anteriormente, carregamento quase estático na ponta da trinca, $K_I^{q.s.}(t)$, comparou com o valor real, determinado experimentalmente pelos valores dinâmicos de $K_I^{dyn}(t)$. Foram utilizados corpos de prova em Araldite e a técnica da sombra óptica e os resultados são apresentados na Figura 2.3. Obviamente $K_I^{q.s.}(t)$ representa uma boa aproximação da curva global de $K_I^{dyn}(t)$, considerando que os fatores de intensidade de tensão determinados a partir da formulação estática da carga do martelo medida, $K_I^{stat}(P_H)$, mostram-se pobres em acordo com $K_I^{dyn}(t)$. Detalhes como as oscilações da curva $K_I^{dyn}(t)$ não podem ser descritas por aproximações quase estáticas [2].

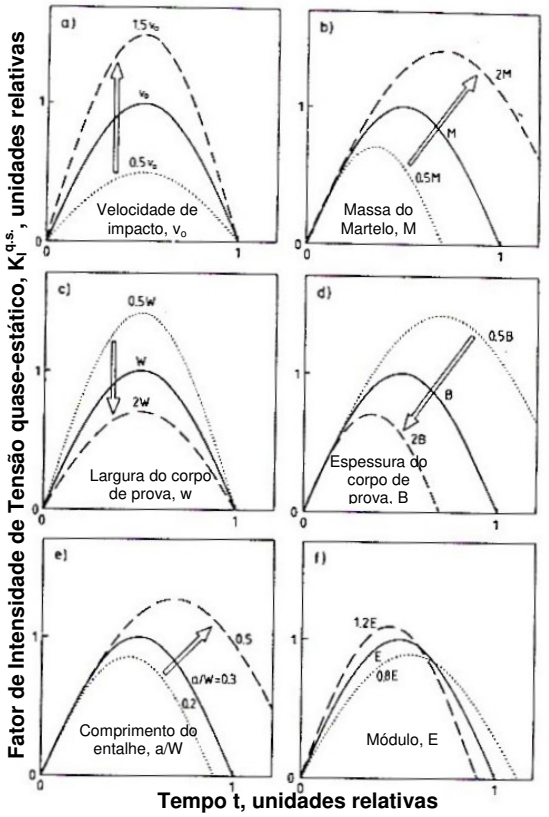


Figura 2.4 – Influência de alguns parâmetros de testes (quase estático).
Fonte: Böhme e Kalthoff (1985).

Na Equação 2.8, k^{dyn}, é uma "função de correção dinâmica" no tempo que quantifica os efeitos dinâmicos. Esta função k^{dyn} é determinada a partir do fator de intensidade de tensão, $K_I^{dyn}(t)$, obtidos experimentalmente ou numericamente, e os valores de $K_I^{q.s.}$, calculados a partir da Equação 2.8. A função de correção dinâmica determinada a partir dos resultados apresentados na Figura 2.3 é mostrada na Figura 2.5. Na Figura 2.6, o tempo é normalizado pelo tempo de propagação de ondas longitudinais através da largura do corpo de prova; c_1 é velocidade de uma onda longitudinal para tensão plana. O valor $k^{dyn} = 1$ representa o comportamento quase estático. As divergências obtidas deste valor são devido aos efeitos dinâmicos. Estes efeitos são grandes no início do impacto e, diminuem com o aumento do tempo e se aproxima ao estado quase estático com o amortecimento da amplitude de oscilação.

Na Figura 2.7 apresentam dados de k^{dyn} obtidos sob diferentes condições de impacto. Corpos de prova com diferentes tamanhos de *W*, mas formas geometricamente semelhantes foram solicitados dinamicamente (impacto) em diferentes velocidades por meio de diferentes massas em queda livre. Apesar de destas variações em condições de teste, todos os dados seguem a mesma curva. Este resultado implica que o k^{dyn} é independente destes parâmetros, isto é, *W*, v_o e *M* desde que a energia de impacto for suficientemente grande [2].

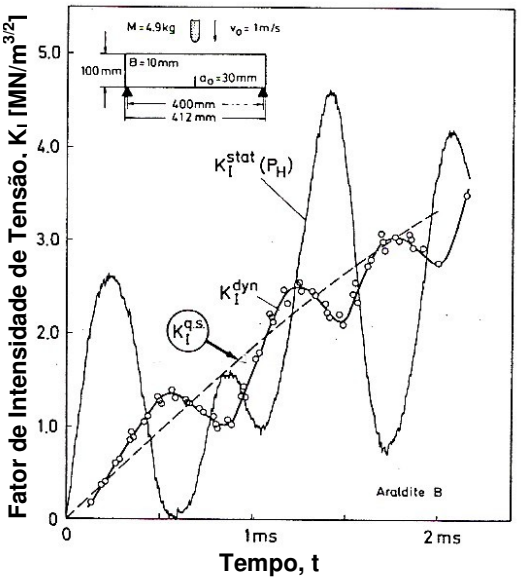


Figura 2.5 – Fatores de Intensidade de Tensão obtidos da formulação quase estática(ASTM E 399), K_I^{stat}, dinamicamente(Tec. Sombra óptica), K_I^{dyn}, e o $K_I^{q.s.}$ calculado numericamente.
Fonte: Böhme e Kalthoff (1985).

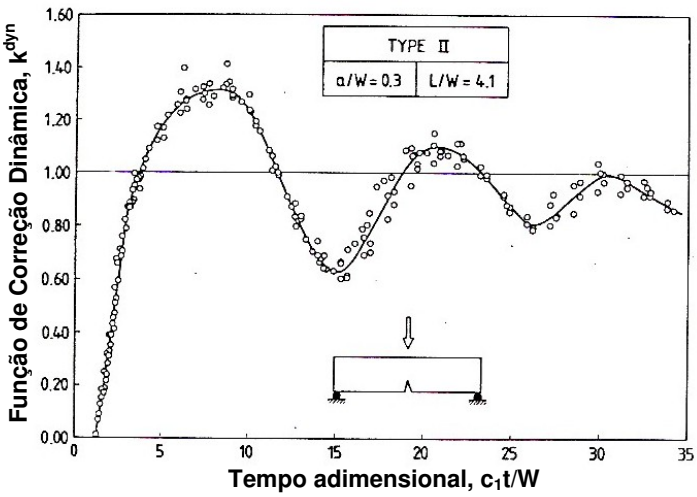


Figura 2.6 – Função de Correção Dinâmica, k^{dyn}, calculada a partir dos dados obtidos na Figura 2.8.
Fonte: Böhme e Kalthoff (1985).

Investigações experimentais detalhadas e estudos em efeitos dinâmicos conduzem a uma avaliação sistemática nesses eventos dinâmicos, que significativamente influenciam no comportamento dinâmico da ponta da trinca. Características específicas da curva k^{dyn} foram correlacionadas a processos físicos. A Figura 2.8 ilustra os resultados obtidos por meio de uma representação esquemática da curva de k^{dyn}. Uma separação grosseira é feita em duas faixas de tempo: uma fortemente influenciada por efeitos dinâmicos e a outra próxima ao comportamento quase estático. A faixa dinâmica é dividida em cinco regiões *1-5*. O começo das regiões é determinado através de eventos dinâmicos significantes.

A região *1* da Figura 2.8 é o primeiro contato entre martelo e o corpo de prova. Ondas elásticas começam a se propagarem no corpo de prova. A região *2* representa a primeira onda de cisalhamento, gerada pelo carregamento, alcançando a ponta da trinca; um significante aumento no carregamento da trinca é obtido. Na região *3*, a primeira frente de onda longitudinal interagida com o limite inferior do corpo de prova excita as ondas de Rayleigh o qual se propagam ao longo das superfícies da trinca e atingem a ponta da trinca; um adicional no carregamento na ponta da trinca é obtido. Na região *4*, depois da reflexão das primeiras ondas compressivas no limite lateral, ondas longitudinais de tração alcançam a ponta da trinca; conseqüente aumento do carregamento na ponta da trinca é obtido. Finalmente a região *5* é causada por comportamento rápido da perda de contato entre o corpo de prova e as partes que o suportam.

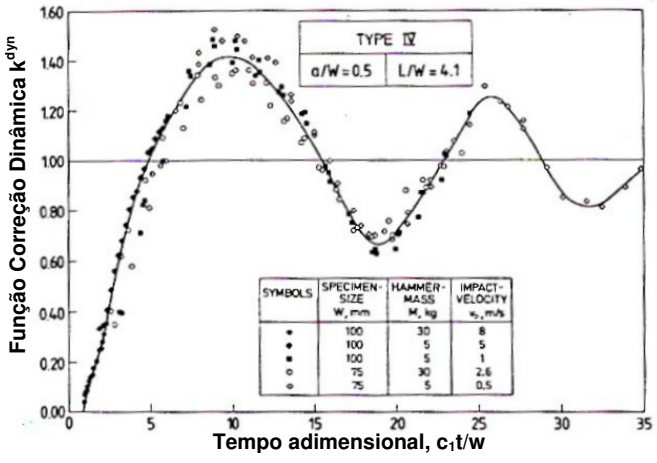


Figura 2.7 – Valores de Correção Dinâmico, k^{dyn}
Fonte: Böhme e Kalthoff (1985).

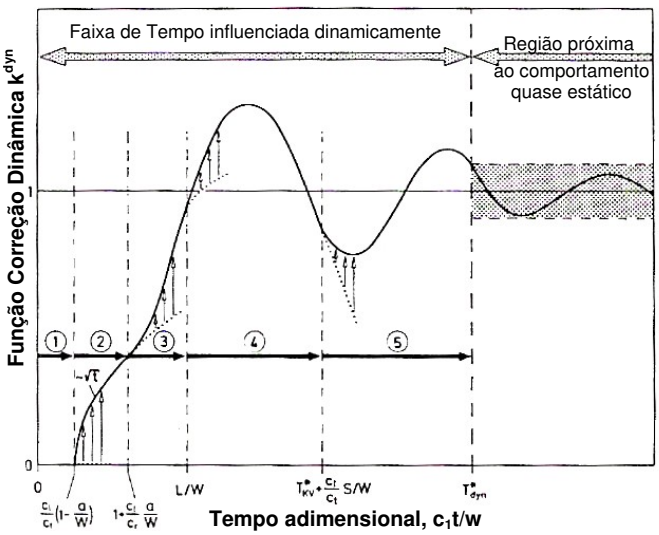


Figura 2.8 – Efeitos Dinâmicos no impacto
Fonte: Böhme e Kalthoff (1985).

Como pode ser visto na Figura 2.8, os tempos estabelecidos para consideração dos efeitos dinâmicos são correlacionados à três parâmetros geométricos, também chamados de parâmetros dinâmicos: *a/W, L/W* e *S/W*. Na maioria das condições de ensaio, o parâmetro *S/W*=4, torna-se praticamente relevante somente *a/W* e *L/W*. Estes dois parâmetros são utilizados para classificar corpos de prova dinamicamente em diferentes tipos. Para quatro tipos de corpos de prova, Tipo I a Tipo IV, as curvas k^{dyn} determinadas experimentalmente são apresentadas na Figura 2.9. O corpo de prova Tipo IV é obviamente mais afetado pelos efeitos dinâmicos. Efeitos dinâmicos reduzidos somente são obtidos para comprimento de trincas menores (Tipo II) e particularmente para corpos de prova de comprimento maiores (Tipo I e III).

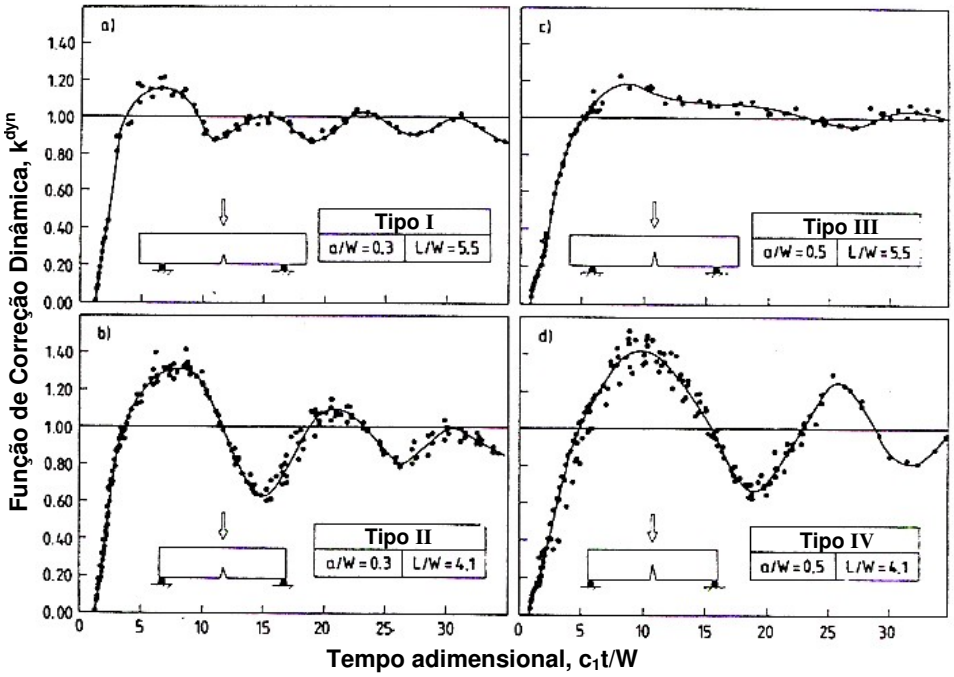


Figura 2.9 – Função de Correção Dinâmica para quatro tipos de corpo de prova.
Fonte: Böhme e Kalthoff (1985).

- ***Aplicações do Método proposto por Böhme e Kalthoff (1985)***

A técnica de medir a tenacidade à fratura dinâmica com o método da curva de resposta ao impacto e as medidas do tempo para fratura têm várias vantagens comparado com o procedimento da ASTM E 24.03.03. A técnica da curva de resposta ao impacto representa uma avaliação completamente dinâmica. Efeitos cinéticos são corretamente considerados durante o

evento do impacto. O método desta forma pode ser aplicado a todas condições de teste experimentais, particularmente também em faixa de tempo para fratura pequena *($t_f < 3\tau$)*, isto é, quando velocidades de impacto altas são utilizadas ou materiais frágeis são ensaiados.

Este método não requer calibração do martelo instrumentado, que normalmente é uma condição prévia em ensaios de impacto projetados para determinar a carga no momento da iniciação da trinca. Os dados que são medidos no procedimento consiste em duas tarefas separadas: a determinação da curva de resposta ao impacto e a medida do tempo para fratura. Uma fórmula aproximada para curvas de resposta ao impacto foi estabelecida que se aplica a diferentes condições experimentais. A determinação de K_{Id} requer somente uma medida simples e barata do tempo para fratura. O tempo para fratura pode ser determinado a partir de sinais obtidos do martelo e corpo de prova instrumentados e não calibrados. Além das técnicas extensométricas, o crescimento instável da trinca pode ser também monitorado por um sensor magnético localizado próximo a ponta da trinca. Assim, a tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id}, de um dado aço é determinado medindo só a tempo-para-fratura em único teste de impacto e utilizando a curva de resposta ao impacto particular a qual é aplica às condições experimentais preestabelecidas.

O conceito das curvas de resposta ao impacto estende o procedimento de avaliação quase estático convencional para fixas de tempo para fratura pequenas. Este procedimento é uma ferramenta de medida apropriada para ensaios em corpos de prova que falham em tempo relativamente pequeno após o impacto, isto é, o procedimento é particularmente satisfatório para ensaios em velocidades de impacto altas e para ensaiar materiais frágeis. A faixa de aplicabilidade do procedimento está limitado pelas condições de baixas escalas de escoamento, porque a singularidade da curva de resposta ao impacto é perdida quando grandes deformações plásticas estarem presentes. Sob condições de grandes deformações plásticas, o tempo para fratura resultante é geralmente suficientemente longo de forma que o procedimento de avaliação de quase estático pode ser aplicado prosperamente. Ambos os procedimentos têm os alcances específicos de aplicabilidade e complementam um ao outro.

2.4. Avaliações da Tenacidade à Fratura Dinâmica proposta por Kobayashi, Yamamoto e Niinomi.

Conforme Kobayashi et al. (1988), no teste de impacto para materiais frágeis, a energia absorvida medida inclui parcelas de energia que não contribuem para o processo de fratura do corpo de prova. Essas parcelas são principalmente energias consumidas pela deformação elástica dos componentes mecânicos da máquina de ensaio e o lançamento das partes do corpo de prova fraturado. Então, em materiais frágeis, a tenacidade avaliada a partir da energia absorvida é muito superestimada e a tenacidade deve ser avaliada separando todas as energias consumidas para cada fenômeno, especialmente no caso de baixas velocidades de impacto de corpos de prova não entalhados.

A relação entre estas energias pode ser escrita da seguinte forma:

$$E_t = E_s + E_m = E_f + E_k + E_m \tag{2.12}$$

onde E_s é a energia absorvida pelo corpo de prova, E_m é a energia absorvida pela deformação elástica dos componentes mecânicos da máquina de ensaio, E_f é a energia consumida na flexão e fratura do corpo de prova, e E_k é a energia consumida para lançar as partes do corpo de prova fraturado. Os valores de E_s e E_k podem ser calculados a partir da Equação 2.20 (descrita futuramente no item *2.5. Efeito da deformação da máquina de teste charpy na tenacidade à fratura dinâmica [Yamamoto et al. 1993]*) e Equação 2.13, respectivamente. A Equação 2.13 assume somente a colisão entre o martelo e corpo de prova por conveniência.

$$E_k = m * M * (1+e)^2 * \frac{V_f}{2*(m+M)^2} \tag{2.13}$$

onde, M é a massa do martelo, m é a massa do corpo de prova, e é o coeficiente de restituição entre o martelo e corpo de prova, V_f é a velocidade final do martelo na fratura.

Segundo Kobayashi et al. (1986, 1987, 1988, 1989, 1993), os valores de força em ensaios dinâmicos em materiais frágeis não refletem os valores reais de resistência que o corpo de prova oferece. Isto porque, quase sempre os materiais frágeis fraturam por forças inerciais gerados pelo impacto, desta forma é impossível refinar a curva. Entretanto, ensaios dinâmicos em materiais frágeis, o efeito do comportamento vibracional pode ser minimizado se o ensaio for conduzido

em baixas velocidades de impacto ou a tenacidade à fratura deve ser avaliada por método baseado no mecanismo de fratura dinâmica.

Assim, Kobayashi et al. (1993) esclarece que a tenacidade à fratura dinâmica pode ser avaliada a partir de dois métodos: Em baixas velocidades de impacto, pode ser que curva força em função do deslocamento reflita o comportamento real do corpo de prova ao impacto, desta forma estima a tenacidade à fratura dinâmica a partir da equação,

$$K_s = \left(\frac{3P_f}{2BW^2} \right) \sqrt{a} * Y \tag{2.14}$$

onde, P_f é o força de iniciação da fratura e Y é a função de a/W.

O outro método para o cálculo da tenacidade à fratura dinâmica e pela equação apresentada por Kishimoto et al. (1980) o qual compensa os efeitos inerciais do impacto.

$$K_d(t) = K_s \left(\frac{w_1}{F(t)} \right) \int_0^t F(\eta) \sin w_1 (t - \eta) d\eta \tag{2.15}$$

onde, w_1 é a freqüência natural do modo fundamental e $F(t)$ é o força em função do tempo. Mas $K_d(t)$ representa somente um valor de referencia devido ao contato perdido, o qual surge nos casos de altas velocidade de impacto como apresentado por Kalthoff (1985). Pode se pensar que o método mais indicado para medir a tenacidade à fratura dinâmica de materiais frágeis é o método de curva de resposta do impacto proposto por Kalthoff. A Figura 2.10 mostra de uma forma comparativa as curvas de resposta ao impacto proposta por Kalthoff e a metodologia proposta por Kishimoto. Nesta figura a linha tracejada representa a curva estimada pelo método de Kishimoto para v_o=0,46m/s, a demais linhas representam as curvas de resposta ao impacto proposto por Kalthoff.

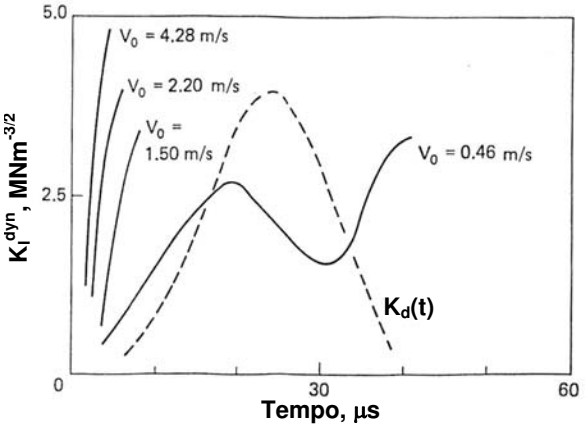


Figura 2.10 – Curva de Resposta ao Impacto para diferentes velocidades de impacto e curva de $K_d(t)$ para v_o=0,46m/s. Fonte: Kobayashi et al. (1988).

Kobayashi, Yamamoto e Niinomi são pesquisadores da Toyohashi University of Technology (Japão) e precursores da metodologia para determinar o ponto de iniciação da trinca na curva Charpy instrumentada. Em 1993, eles desenvolveram um sistema de avaliação da tenacidade à fratura dinâmica auxiliada por computador, associando-o à máquina de ensaio Charpy convencional. Por meio deste sistema, denominado de *Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing – CAI* - foi possível determinar a tenacidade à fratura dinâmica, dada pelos parâmetros K_{Id} e J_{Id}, além das energias obtidas com base nas curvas força em função do deslocamento, oriundas de corpos de prova Charpy-V pré-trincados. A metodologia para detecção da iniciação da trinca e determinação do J_d consistia no uso da *taxa de alteração da flexibilidade* (*CCR – compliance changing rate*).

A *CCR* é definida desta forma,

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C - C_{el}}{C_{el}} \tag{2.16}$$

onde $\Delta C/C$ é a taxa de alteração da flexibilidade, C é a flexibilidade elástica aparente e C_{el} é a flexibilidade elástica e é definido da seguinte forma,

$$C_{el} = \frac{s_{el}}{P_{el}}$$

onde, s_{el} é ponto de escoamento no deslocamento e P_{el} é o força correspondente ao escoamento.

Quando *ΔC/C* é plotado em função do deslocamento, subitamente surge um ponto de transição do gradiente na curva. Na Figura 2.11 mostra esquematicamente uma curva *ΔC/C* em função do deslocamento e os estágios da curva.

O princípio do Método da Taxa de Alteração da Flexibilidade é definido como: (i) na área da deformação elástica, a flexibilidade elástica do corpo de prova mantém-se constante e *ΔC/C* é zero. (ii) na área plástica, *ΔC/C* é aumentado por um incremento que depende do encruamento do material. (iii) quando a trinca inicia-se, o incremento de *ΔC/C* aumenta largamente devido a diminuição de seção do corpo de prova. O ponto de transição entre (ii) e (iii) é definido como ponto de iniciação da trinca, conseqüentemente determina-se a energia necessária para iniciar a trinca, E_i. A partir da Equação 2.17 determina-se o valor de J_{Id}.

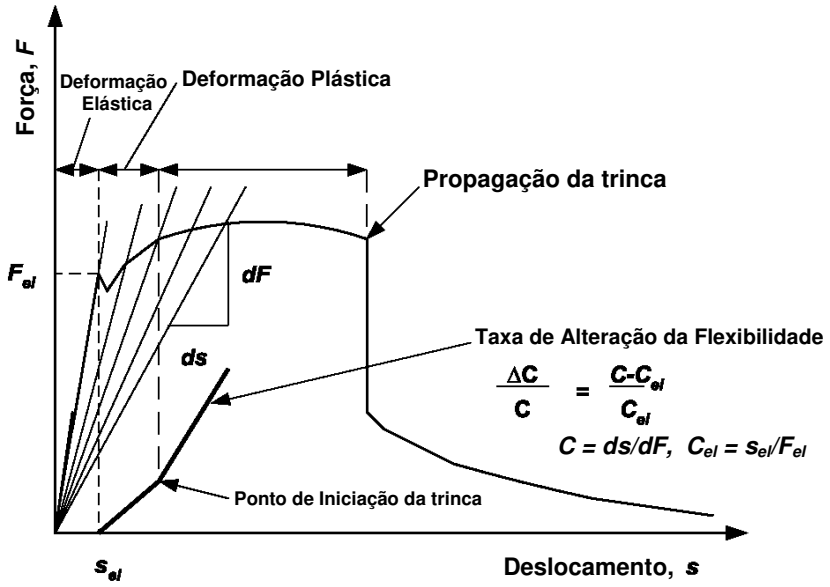


Figura 2.11 – Explicação esquemática do Método Taxa de Alteração da Flexibilidade.
Fonte: Kobayashi, Yamamoto e Niinomi (1993).

Na avaliação da tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica, J_d, Yamamoto et al. utilizava a equação de Rice,

$$J_{Id} = \frac{2E_i}{B(W-a)} \tag{2.17}$$

onde, *w* é a largura do corpo de prova, *B* é a espessura do corpo de prova e a é o comprimento inicial da pré trinca e E_i é a energia necessária para a iniciação da trinca.

Os autores do método *CCR* desenvolveram no ano 1986, com o auxílio da concepção fundamental de Ernest et al. (1979), uma metodologia para estimar o crescimento do trinca Δa. A metodologia denominada método da curva chave *(Key Curve method)* era fundamentada na seguinte equação,

$$\frac{PW}{b_0^2} = k\left(\frac{\Delta_{pl}}{W}\right)^n \tag{2.18}$$

onde P é o força, Δ_{pl} é o deslocamento plástico, b_0 é o ligamento inicial (W-a), k e n são constantes. Os valores de k e n foram determinados ajustando a curva força em função do deslocamento do corpo de prova. Nesta análise, o ajuste era limitado até o máximo ponto de deslocamento, onde não havia uma extensão de trinca notável. Ambos os lados da Equação 2.18 foram alterados para uma escala logarítmica e os resultados foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados. A inclinação da curva ajustada é o valor n e a intersecção é o valor k. A faixa de ajuste foi alterada para o ponto de iniciação da trinca detectado pelo método *CCR*, e os valores de n e k também foram determinados para o caso de um corpo de prova pré-trincado por fadiga.

O método da curva chave é baseado na suposição que a curva força em função do deslocamento com crescimento de trinca cruzará uma curva sem crescimento de trinca na relação *a/W* como esquematizado na Figura 2.12. A extensão da trinca é calculada a partir da equação a seguir,

$$\Delta a = W - \left(\left(\frac{PW^{n-1}}{k\Delta_{pl}^n}\right)^{1/2} + a\right) \tag{2.29}$$

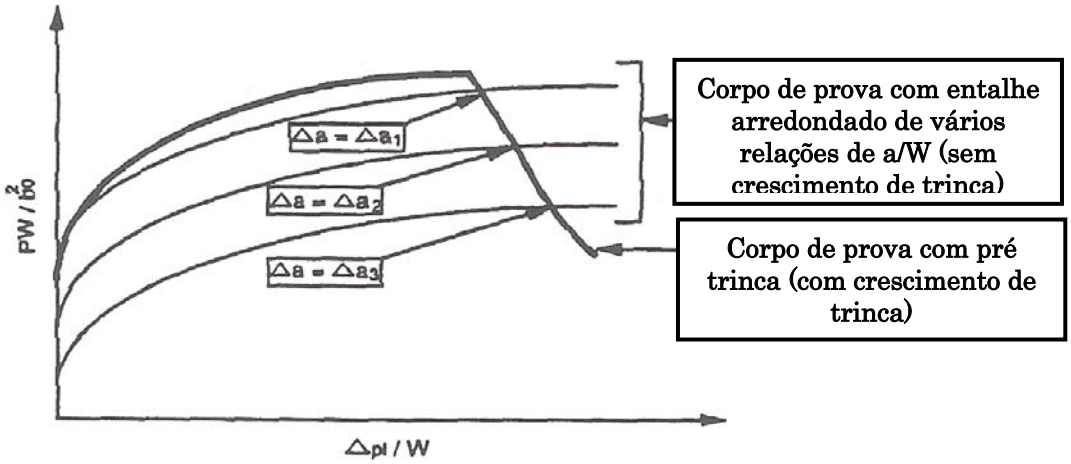


Figura 2.12 – Explicação esquemática do método da curva chave (Δa representa a extensão da trinca).
Fonte: Yamamoto et al. (1993)

Para validar o método da curva chave, Yamamoto et al. comparou os resultados obtidos com os resultados do método do teste interrompido *(Stop Block Method).* A Figura 2.13 mostra a extensão da trinca em função do deslocamento do corpo de prova Charpy em aço A533B obtidos a partir do método de curva chave e do método do teste interrompido. Nota-se que a extensão da trinca obtida em ambas metodologias são similares a partir do valor de extensão da trinca de 2*mm*. Ademais, a curva de resistência à propagação da trinca, curva *J-R*, foi calculada a partir das equações 2.17 e 2.19, para a curva de força em função do deslocamento de um corpo de prova pré-trincado.

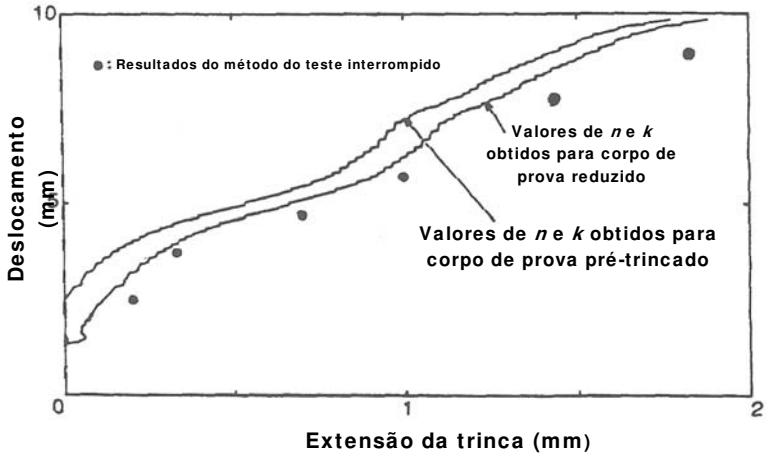


Figura 2.13 – Extensão da trinca em função do deslocamento para corpos de prova Charpy (aço A533B)
Fonte: Yamamoto et al. (1993).

Kobayashi (1983) apresentou o método do teste interrompido que consistia em utilizar múltiplos corpos de prova e um dispositivo chamado bloco de parada posicionado atrás do corpo de prova que, compulsoriamente parava o martelo até um determinado deslocamento do corpo de prova. Desta forma vários comprimentos de trinca podiam ser obtidos por meio do posicionamento do bloco de parada. O deslocamento correspondente a Δa =0 era determinada baseada na relação linear entre o deslocamento e Δa. A Figura 2.14 apresenta esquematicamente a metodologia. Já foi averiguado para diversos materiais que o método do teste interrompido é capaz de obter resultados de tenacidade à fratura e medidas de resistência à propagação da trinca em condições dinâmicas com elevada acuracidade (Kobayashi et al., 1993).

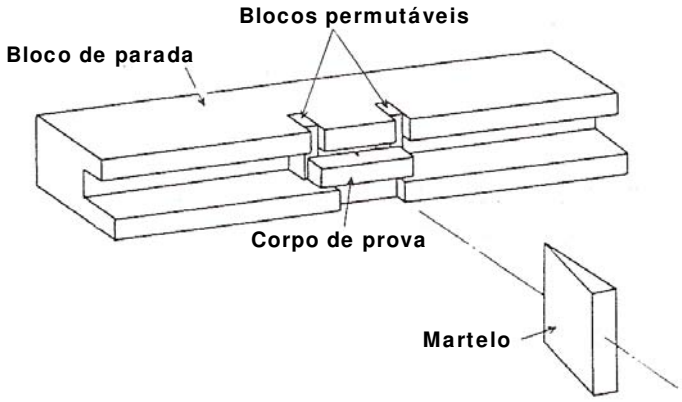


Figura 2.14 – Representação esquemática do método do teste interrompido.
Fonte: Kobayashi et al. (1989).

Na Figura 2.15 são apresentadas as curvas taxa de alteração da flexibilidade em função do deslocamento e força em função do deslocamento para o caso de um corpo de prova com espessura de 10 e 5*mm* respectivamente. O início da curva *ΔC/C* corresponde o ponto de escoamento. Nota-se a proximidade entre os valores de iniciação de trinca estimado determinados pelo método do teste interrompido e pelo método da alteração da taxa da flexibilidade. Os valores de J_d obtidos por ambos os métodos estão apresentados na Tabela 2.2. Após estas observações, Kobayashi et al. (1986) concluíram que a metodologia da alteração da taxa de flexibilidade pode ser aplicada para determinar o ponto de iniciação da trinca em corpos de prova pré-trincados.

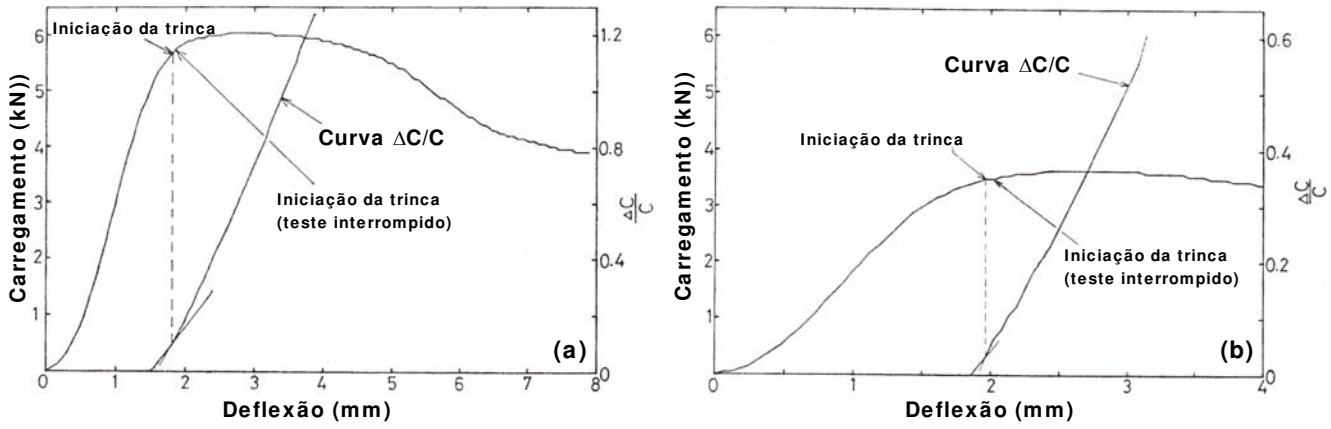


Figura 2.15 – Análise comparativa dos métodos para determinar o ponto de iniciação da trinca. (a) B=10*mm* e (b) B=5*mm*. Fonte: Kobayashi et al. (1986).

Tabela 2.2– Valores de tenacidade à fratura dinâmica J_d obtidos pelos métodos da taxa da alteração da flexibilidade e pelo método do teste interrompido. Fonte: Kobayashi et al. (1989).

Material	J_d (kN/m)	
	Taxa da alteração da flexibilidade	**Teste interrompido**
DCI	29,5	30,4
Ti-6.2.4.6	96,0	98,5
7075 Al	8,79	11,1
SS41	47,0	59,8
HT80	135,2	166,6
SS41 tratado term.	57,0	40,0
HT80 tratado term.	119,0	109,8

Chen e Shi (1990) comparam vários valores de tenacidade à fratura do aço API X-52 obtidos de a partir do ensaio Charpy instrumentado. Para tanto, eles utilizaram sete métodos de avaliação:

- Método da energia de carregamento máximo *(Pre-Maximum Load Energy Method)*;
- Método da taxa de alteração da flexibilidade *(Compliance Changing Rate Method)*;
- Teste de baixa amplitude *(Low Blow Test)*;
- Relação de COD de Kobayashi *(Kobayashi`s COD Relation)*;
- Medida do tamanho da zona deformada *(Stretch Zone Size Measurements)*;
- Curva J-R *(J-R Curve)*;
- Método da energia equivalente *(Equivalent Energy Method)*.

Baseado neste estudo comparativo da estimativa de J_{Id}, o teste de baixa amplitude foi considerado o melhor procedimento e o método da alteração da taxa de flexibilidade foi considerado o mais rápido e o menos oneroso para os meios práticos da engenharia.

2.5. Efeito da vibração e deformação elástica da máquina de teste Charpy na tenacidade à fratura dinâmica (Yamamoto et al., 1993)

Quando o impacto é aplicado, o martelo deforma elasticamente e vibra periodicamente. A Figura 2.16 apresenta a resposta no tempo do carregamento do martelo Charpy e a resposta de um golpe na extremidade do martelo Charpy por um de martelo de impacto. As ondas vibracionais podem ser observadas na resposta do carregamento do martelo Charpy, neste caso no primeiro sinal. Figura 2.17 mostra o espectro em freqüência da Figura 2.16. Na Figura 2.17 é possível determinar a freqüência da onda vibracional superpondo os dois sinais da Figura 2.16 que é de 525*Hz*, o qual acontece a vibração natural do martelo. Na Figura 2.18 mostra o modo de vibração do martelo excitado em 525*Hz*. Quando o martelo é excitado em 525*Hz*, ambos extremos do martelo são deformados reciprocamente e a ponta do martelo, onde estão localizados os extensômetros, é deformado pela freqüência natural do martelo. Pode ser pensado a partir dos resultados acima, que a onda vibracional causada pela freqüência natural é superposta na curva força em função do deslocamento usual obtida do ensaio Charpy instrumentado e a forma da curva força em função do deslocamento deve ser alterada. Por conseguinte, para validar a medida da tenacidade à fratura dinâmica, o efeito da onda vibracional causada pela vibração natural do martelo deve ser esclarecido e considerado na metodologia para obtenção da tenacidade á fratura dinâmica.

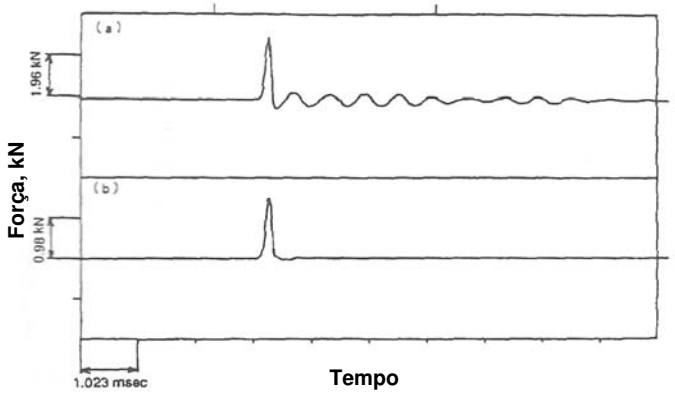


Figura 2.16 – (a) Resposta no tempo do martelo no impacto e (b) Resposta no tempo do martelo sob efeito do martelo de impacto.

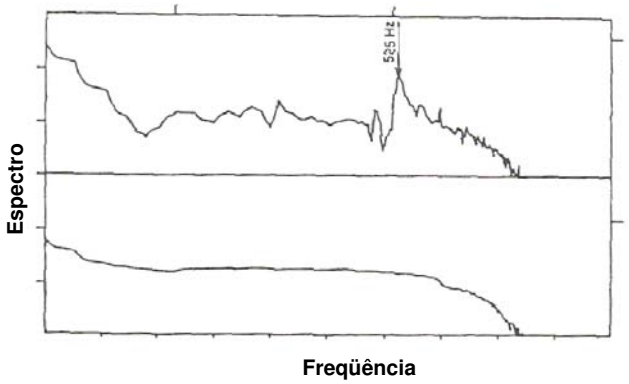


Figura 2.17 – Espectro em freqüência dos sinais da Figura 2.16

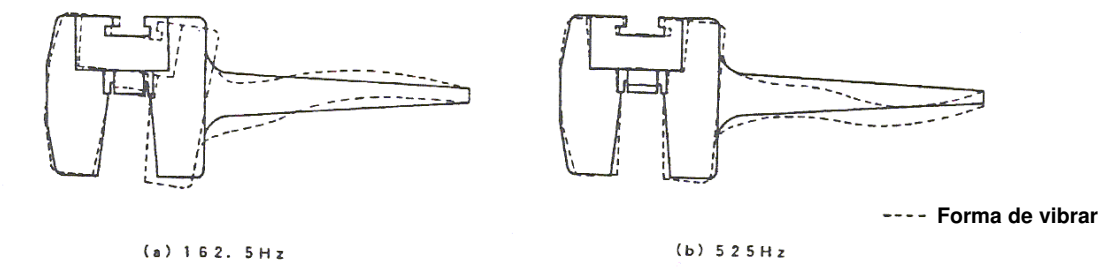


Figura 2.18 – Forma de vibrar do martelo na freqüência natural.
Fonte: Yamamoto et al. (1993).

Yamamoto et al. esclareceu os resultados da deformação do martelo da seguinte forma: Na Figura 2.19 são apresentados as curvas força em função do tempo e deslocamento em função do tempo do aço SS41 obtidas em diferentes velocidades de impacto. Na Figura 2.19(a), quando a diminuição da velocidade de impacto é grande, o pico causado pelo recarregamento após o ponto de força máxima é observado. Porém, quando a diminuição da velocidade de impacto é pequena, o pico não pode ser observado como mostra a Figura 2.19(b).

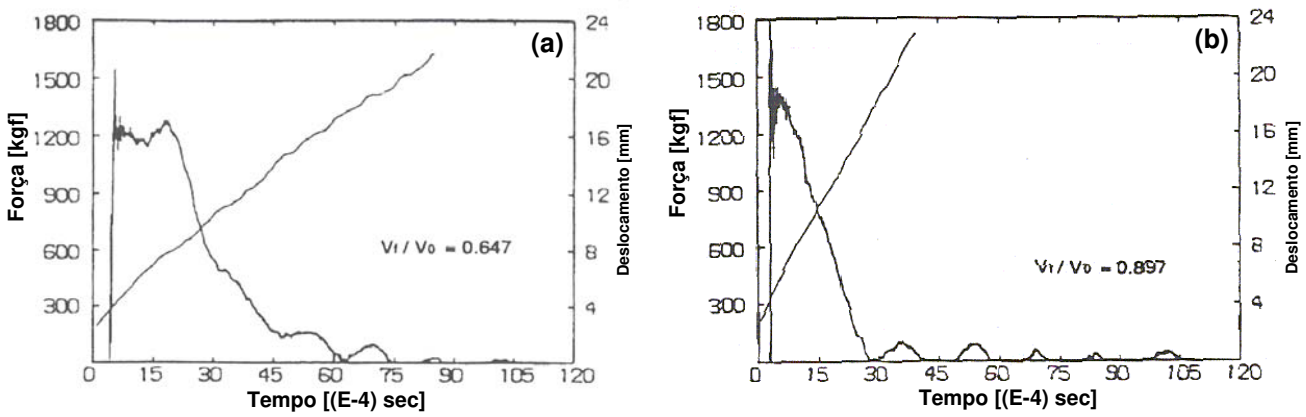


Figura 2.19 – Curvas força em função do tempo e deslocamento em função do tempo em diferentes velocidades de impacto.
Fonte: Yamamoto et al. (1993).

A razão deste fenômeno, assim como o efeito complexo da vibração natural do martelo e a alteração do estado de restrito de deformação do martelo são explicados a seguir.

(1) Como previamente mencionado, quando o corpo de prova é golpeado pelo martelo de impacto, o martelo vibra na freqüência de natural. Porém, no teste de impacto Charpy, a deformação do martelo é restrita pelo corpo de prova durante o impacto e então o martelo não pode vibrar livremente. Contudo, desde a restrição do martelo é relaxado gradualmente depois do

ponto de força máxima, o martelo torna-se fácil de vibrar e deformar na freqüência natural do martelo (mas, esta freqüência não é perfeitamente a freqüência natural). Então, como mostrado na Figura 2.19, o extensômetro posicionado na extremidade é deformado pela vibração natural do martelo e o pico surge depois do ponto de força máxima.

(2) Em adição ao apresentado acima, é considerado que um efeito de inércia também é sobreposto. Quer dizer, quando o corpo de prova é solicitado ao impacto, ele é acelerado e o martelo é desacelerado reciprocamente. Adequadamente, o martelo não pode equiparar a deformação do corpo de prova e o estado de contato entre o corpo de prova e o martelo é relaxado. Este relaxamento está marcado no teste de impacto com baixa velocidade.

(3) Além disso, em geral, a energia de deformação elástica é armazenada na máquina de teste até o ponto de força máxima. Quando a diminuição de velocidade do martelo é pequena, esta energia elástica é liberada instantaneamente. Porém, quando diminuição de velocidade é grande, a energia elástica é liberada equilibrando com a resistência à propagação da trinca dos materiais. Este comportamento influi no estado de restrição da deformação do martelo.

Embora a vibração natural do martelo é a razão principal, ambos os comportamentos, que são o efeito da inércia causada pela aceleração do corpo de prova e desaceleração do martelo e a liberação da energia de deformação elástica armazenada na máquina de ensaio, promovem a vibração natural do martelo simultaneamente.

No sistema desenvolvido por Yamamoto et al., quando a tenacidade à fratura dinâmica era avaliada, a condição de energia aplicada dado pela Equação 2.20 é recomendada para evitar a diminuição da velocidade do martelo durante impacto e obter a tenacidade válida.

$$E_0 \geq 3 * E_t \tag{2.20}$$

onde E_0 é a energia aplicada e E_t, é a energia absorvida total.

Como previamente mencionado, a máquina de teste é deformada elasticamente durante o impacto. Então, além da energia absorvida pelo corpo de prova, a energia absorvida medida inclui a energia consumida pela deformação elástica da máquina de ensaio. Para obter o valor real da tenacidade à fratura dinâmica, a energia absorvida pelo corpo de prova deve ser medida. Yamamoto et al. utilizou o método da correção da flexibilidade. No método da correção da flexibilidade, a energia consumida pelo corpo de prova é determinada subtraindo a parcela da energia dissipada na deformação elástica da máquina da energia total absorvida, utilizando a equação a seguir,

$$E_i = E_S * \left(\frac{C_s}{C_t} \right) \tag{2.21}$$

onde, E_i é a energia absorvida pelo corpo de prova até o ponto de iniciação da trinca, E_S é a energia total obtida, C_s é a flexibilidade do corpo de prova e C_t é a flexibilidade total.

A flexibilidade do corpo de prova, C_s, pode ser obtida pela equação a seguir,

$$C_s = \frac{S^2}{EBW\left(Y + \frac{0{,}29W^2}{(W - a_0) * \left(\log\left(\frac{1}{V_0} \right) - 0{,}339 \right)} \right)} \tag{2.22}$$

onde, S é o comprimento do vão, E é o módulo de Young, V_0 é a velocidade inicial no impacto e Y é a função de a/W. Os estudos na flexibilidade do corpo de prova mostraram que C_s altera-se hiperbolicamente com a velocidade de impacto. Na Equação 2.22 comprova o efeito da velocidade de impacto no C_s. Yamamoto et al. constatou que o método da correção da flexibilidade aplicado para diversos materiais pode superestimar largamente o valor de tenacidade à fratura dinâmica. Entretanto, no caso de materiais dúcteis, o método da correção da flexibilidade é uma metodologia precisa para avaliação da tenacidade à fratura dinâmica. A Figura 2.20 mostra uma comparação entre os valores de energia absorvida pelo corpo de prova antes do ponto de iniciação da trinca com o método da correção da flexibilidade e sem o método para diferentes materiais.

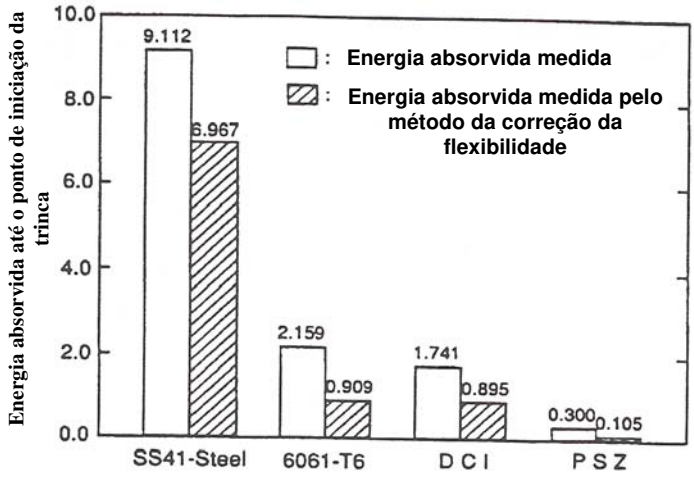


Figura 2.20 – Comparação entre os valores de energia absorvida sem o método da correção da flexibilidade e com o método. Fonte: Yamamoto et al. (1993).

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

Utilizou-se neste trabalho a variação do aço ABNT/SAE 4340 de qualidade aeronáutica e de alta temperabilidade para propiciar condições distintas de tenacidade em função da microestrutura, desta forma foi capaz de produzir diferentes comportamentos à fratura e avaliar o sistema de medida do ensaio de impacto Charpy instrumentado desenvolvido neste trabalho e a tenacidade à fratura dinâmica.

Empregaram-se vários ciclos térmicos. As variáveis de influência nos ciclos foram as condições de revenimento aplicadas. As temperaturas de revenido foram 473K, 573K, 673K e 773K. Dois tipos de entalhes foram adotados, o entalhe arredondado, característico do ensaio de impacto convencional e o entalhe com pré trinca, obtido por fadiga. Todas as condições de microestrutura e entalhe, foram submetidas aos ensaios de impacto instrumentado e ensaio de flexão em três pontos com carregamento monotônico.

Os ensaios de impacto instrumentado foram realizados em uma máquina de ensaio de impacto convencional munida do sistema de instrumentação que consistia em uma célula de carga, amplificador de sinais, digitalizador e processamento de sinais. A tenacidade à fratura era obtida a partir dos resultados do ensaio de impacto instrumentado com o auxílio de rotinas computacionais. Após os ensaios, foi identificado o micromecanismo de fratura de cada condição.

3.2 Materiais

O aço ABNT 4340 foi recebido na forma de barra laminada de seção circular (φ 16mm), sem tratamento e sem acabamento. Na Tabela 3.1 a composição química realizada no laboratório de ensaios de materiais – CT/Unicamp pelo método de fluorescência de raios-x. Como medida classificatória e de referência, está apresentado na Tabela 3.2 a faixa de composição química em peso (balanço com Fe) do aço SAE 4340 retirado da literatura.

Tabela 3.1 – Composição química realizada no laboratório de ensaios de materiais CT/Unicamp.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu	Ni
Barra Comercial 03 (Análise Laboratorial)	0,43	0,18	0,77	0,025	0,008	0,76	0,29	0,020	0,21	1,65

Tabela 3.2 – Faixa de composição química (% em peso) do aço ABNT 4340.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Cu	Ni
Níveis aceitáveis de composição química para o aço SAE 4340*	0,38-0,43	0,15-0,35	0,60-0,80	0,030	0,040	0,70-0,90	0,20-0,30	-----	-----	1,65-2,00

*Valores encontrados na Tabela: *(R) Table 1ª - Alloy Steel Compositions*, pg. 1.13, SAE Handbook, vol.1, 1995.

3.3 Métodos Experimentais

3.3.1 Confecção dos corpos de prova

Utilizou-se neste trabalho corpos de prova Charpy, para a realização dos ensaios monotônicos e dinâmicos e corpos de prova para o ensaio de tração. Foram confeccionados a partir do material como recebido, tendo sido retirados das barras segundo a direção de laminação. Devido à quantidade de material disponível, para os propósitos pretendidos, a confecção dos corpos de prova foi cuidadosamente planejada. A preocupação foi garantir um número mínimo de corpos de prova para cumprir o programa de ensaios previamente planejado.

a) Ensaio de flexão e ensaio de impacto.

A etapa inicial consistiu no aplainamento das amostras próximas às dimensões acabadas. Em seguida, as amostras foram usinadas em retífica plana universal conforme os limites

aceitáveis estabelecidos na norma ASTM E23. Os entalhes foram feitos mecanicamente em uma brochadeira e utilizado uma ferramenta especial para um entalhe do tipo A, com configuração em V, formando um ângulo de 45º, profundidade de 2,0 mm e raio da raiz de 0,25 mm. Foi criado um gabarito para inspeção dos entalhes e controle dos mesmos, para garantir uniformidade. Esses corpos de prova foram utilizados tanto para o ensaio dinâmico com para os de flexão de três pontos, sendo que os corpos de prova utilizados nos ensaios monotônicos foram usinados dois furos para fixar um par de dispositivo chamado "*Knife edges*", utilizados no monitoramento do crescimento da trinca foi realizado com o equipamento chamado *Clip on Gage*.

A configuração dos corpos de prova para os ensaios de impacto está apresentado na Figura 3.1. A Figura 3.2 mostra os corpos de prova para ensaio de flexão em três pontos e detalhes dos "*Knife edges*".

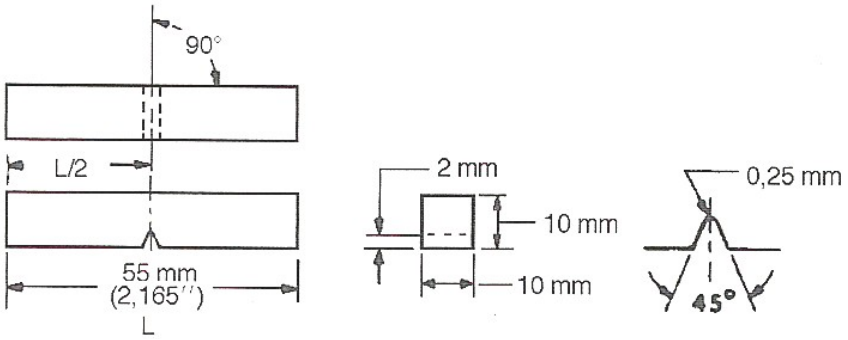


Figura 3.1 – Corpo de prova de ensaio de impacto do Tipo A conforme a norma ASTM E23.

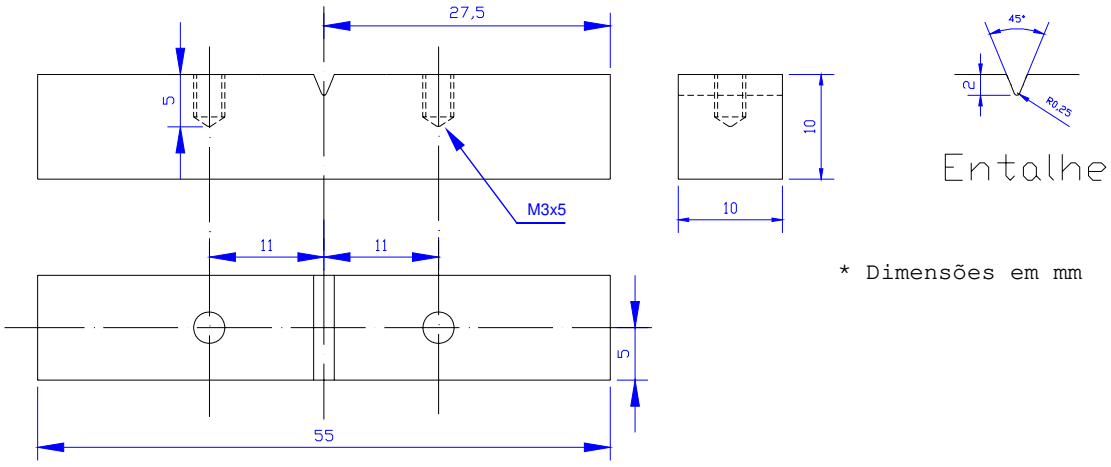


Figura 3.2 – Corpo de prova de ensaio de flexão com entalhe em V e posição dos furos para fixação do *Clip on gage*.

b) Ensaio de tração.

Os corpos de prova para ensaio de tração foram confeccionados a partir do material como recebido. O sentido de retirada dos corpos de prova foi segundo a direção de laminação.

Foram retiradas amostras próximas ao comprimento e usinadas em torno universal em corpos de prova cilíndricos de acordo com as recomendações da norma ASTM E08M. As dimensões nominais destes corpos de prova se encontram na Figura 3.3.

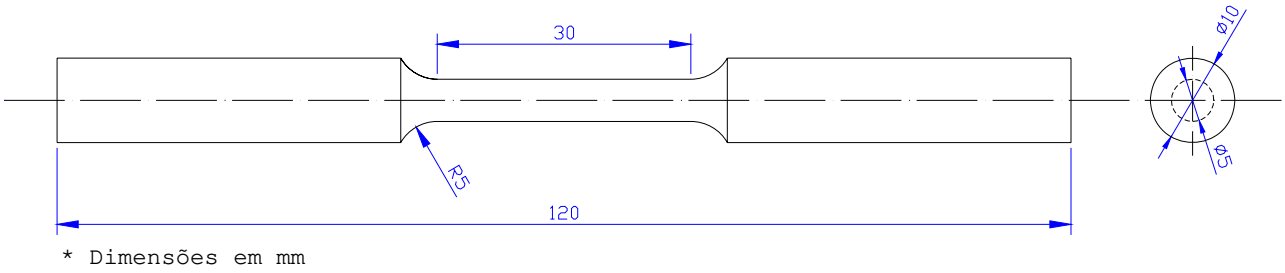


Figura 3.3 – Corpo de prova de ensaio de tração conforme a norma ASTM E08M.

c) Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos foram realizados sob criteriosos requisitos de controle. Era realizado um ciclo térmico em lote composto de até seis corpos de prova de impacto e três corpos de prova de tração. Um forno tubular de controle de subida de temperatura foi utilizado nos ciclos térmicos sob proteção de argônio (atmosfera inerte) nos corpos de prova. Tokimatsu (1995) observou para uma proteção eficaz contra descarbonetação era necessário uma lavagem com argônio durante 30 minutos antes dos corpos de prova serem submetidos às temperaturas elevadas. Esta metodologia foi adotada neste trabalho antes de qualquer tratamento térmico.

A temperatura do forno era fundamental nos ciclos térmicos. Uma avaliação foi feita no sentido de determinar qual era a melhor região para o controle de temperatura do forno. Um controlador de temperatura de fundo de escala de 1273 K, dois termopares do tipo K e um multímetro digital foram utilizados nesta metodologia. Nesta avaliação, um termopar conectado ao controlador foi posicionado próximo à resistência elétrica na região externa do forno, e o outro termopar conectado ao multímetro, foi instalado no interior do forno. As especificações dos

equipamentos utilizados estão apresentadas na Tabela 3.3. Após uma hora, tempo de aquecimento (rampa), até a temperatura de 1118 K, notou-se uma diferença de aproximadamente 40 graus entre as regiões interna e externa. Definiu-se então que a região para melhor controle da temperatura para os tratamentos térmicos era a região interna do forno. A Figura 3.4 apresenta um esquema do sistema de aquecimento e a Figura 3.5 mostra o detalhe do forno, controlador, multímetro e termopares.

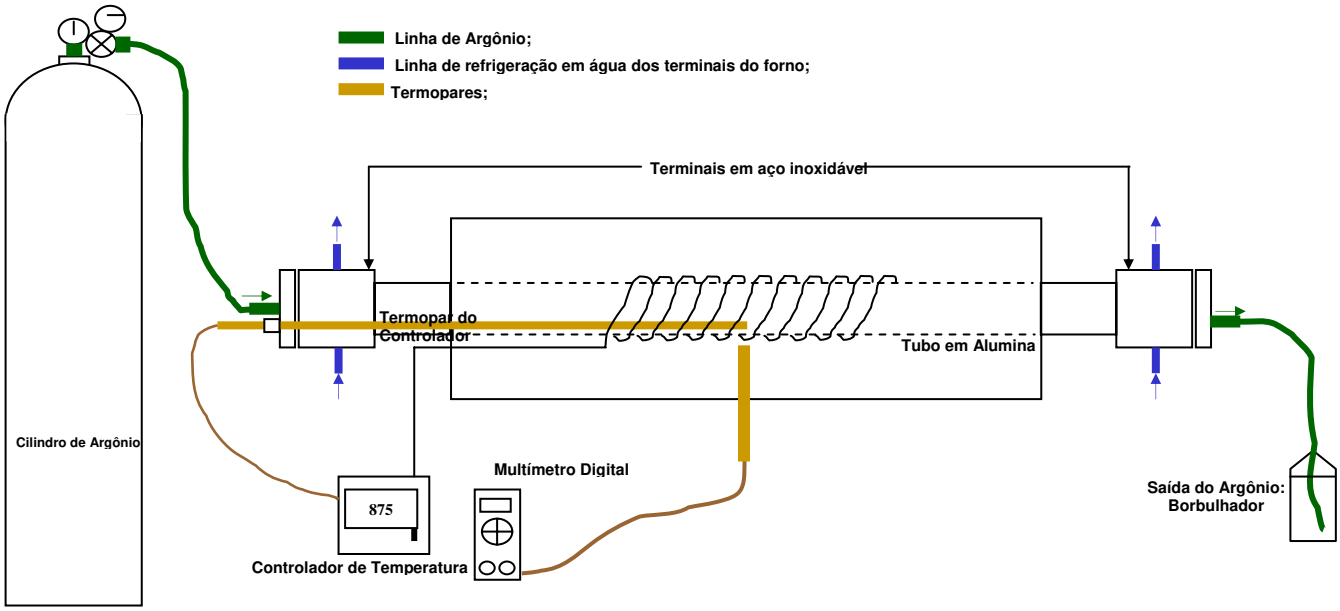


Figura 3.4 – Esquema do sistema de tratamentos térmicos.

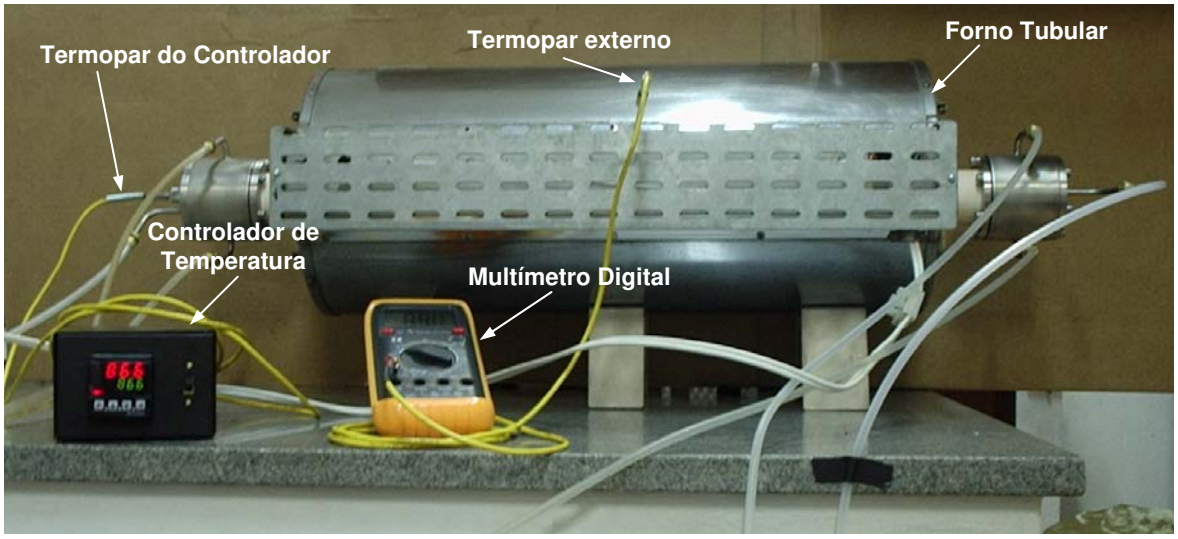


Figura 3.5 – Detalhe do forno, controlador e multímetro digital.

Tabela 3.3 – Especificações técnicas dos materiais utilizados nos tratamentos térmicos.

Equipamento	**Especificação Técnica**
Forno Tubular	Marca: Marshall Furnace Modelo: 1137, Diâmetro 50,8 mm Voltagem: 220 Volts
Controlador de Temperatura	Marca: Novus Modelo: N1100 Rele de estado sólido: 40 Amperes
Multímetro Digital	Marca: Minipa Modelo: ET-2042
Óleo para têmpera	Marca: Castrol Modelo: GTX SAE 20W/50 Quantidade: 20litros
Termopar interno	Marca: Consistec Modelo: Tipo K, Inconel, diâmetro de 3mm, comprimento de 500mm.
Termopar externo	Marca: Consistec Modelo: Tipo K, Inconel, diâmetro de 3mm, comprimento de 200mm.
Argônio	Fornecedor: White Martins Ltda Modelo: 5.0 Analítico Quantidade: 10,0m^3

Foi determinada a região útil do forno, ou seja, qual era o comprimento da região a uma dada temperatura que não houvesse variação de ±10 Kelvin. Esta variação foi aceita depois de uma análise na literatura para determinar qual era a temperatura de austenitização do aço SAE 4340. Conforme apresentado no *Metals Handbook, vol. 4 – Heat Treating/Austenitizing*, a faixa de temperatura de austenitização para o aço SAE 4340 é de 1088 a 1118 K. Foi utilizado um termopar com haste de 600mm e o multímetro digital na avaliação do comprimento útil do forno. A Figura 3.6 apresenta o perfil de temperatura do forno. O comprimento da área útil determinada foi de 120mm, satisfatório para realizar os tratamentos térmicos deste trabalho.

- ***Tratamento de austenitização***

Os corpos de prova foram submetidos à temperatura de austenitização de 1118K, com tempo de rampa de 90 minutos e permanência de 60 minutos. Em seguida os corpos de prova eram resfriados em óleo agitado. A curva temperatura em função do tempo para o Tratamento de austenitização está apresentado na Figura 3.7.

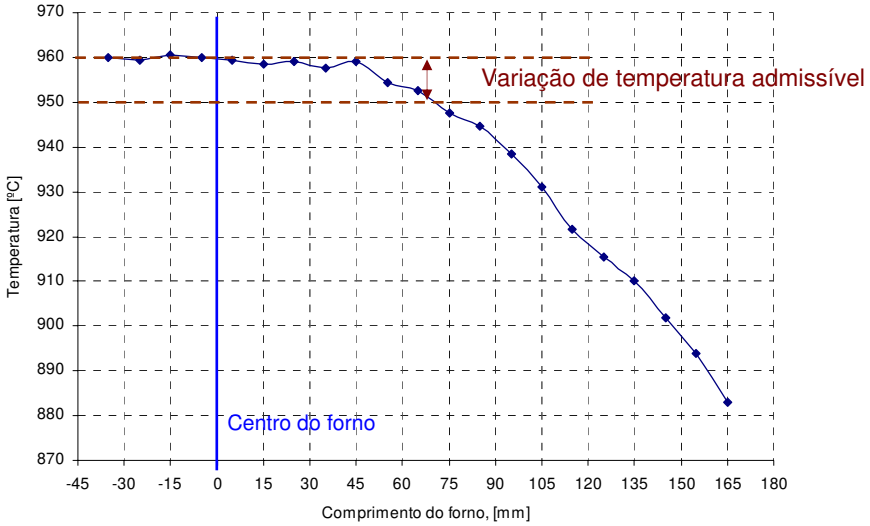


Figura 3.6 – Perfil de temperatura do forno tubular.

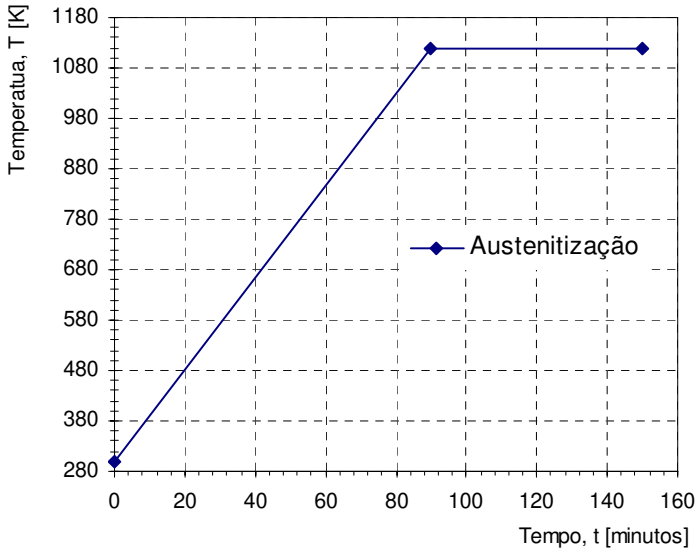


Figura 3.7 – Curva temperatura em função do tempo para o tratamento de austenitização.

- ***Tratamento de Revenido***

Após a têmpera, os corpos de prova foram submetidos a tratamentos de duplo revenido com duração de 60 + 60 minutos nas temperaturas de tratamento, 473K, 573K, 673K e 773K, sempre com resfriamento em óleo. As curvas de temperatura em função do tempo para os ciclos de revenido estão apresentados na Figura 3.8.

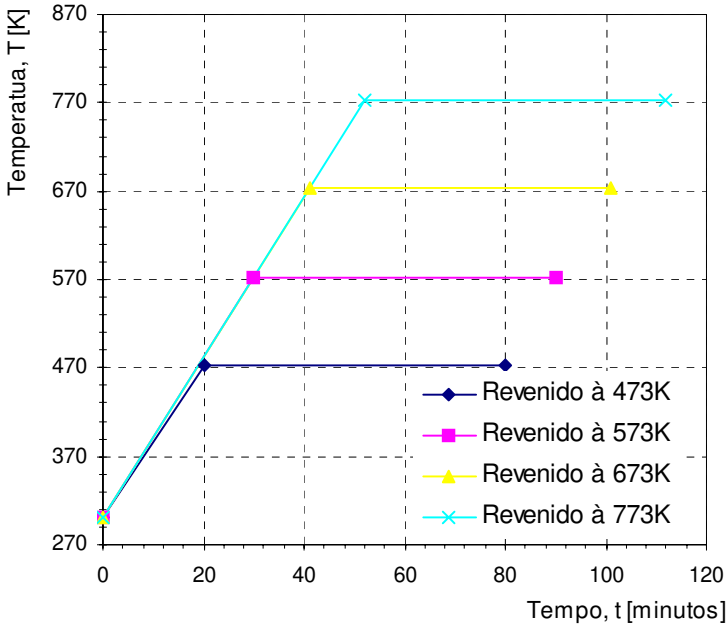


Figura 3.8 – Curvas temperatura em função do tempo para os tratamentos de revenido.

3.3.2 Metodologia para obtenção da Pré-trinca por fadiga nos corpos de prova

Para gerar a trinca por fadiga na raiz do entalhe, os corpos de prova foram solicitados por flexão em uma máquina MTS modelo 810 de capacidade 10t, do Laboratório de Propriedades Mecânicas do DEMA/FEM/UNICAMP. O controle sobre a propagação da pré-trinca por fadiga seguiu por dois estágios.

Dois estágios foram utilizados na confecção da pré-trinca; o estágio de nucleação e o processo de propagação. O estágio da nucleação compreendeu a fase inicial de surgimento e um pequeno crescimento a partir da raiz do entalhe de aproximadamente 1,0mm da pré-trinca. Para acelerar o estágio de nucleação da trinca foram utilizadas cargas maiores do que o processo de propagação. Inicialmente, as condições de carregamento foram estimadas com base nas

recomendações das normas ASTM E1290 e ASTM E399. Contudo, houve alguns corpos de prova que romperam devido ao excesso de carga aplicada. A definição da condição de carga aplicada foi também obtida experimentalmente.

O processo de propagação foi dividido em dois tempos para maior controle do crescimento da trinca. Estes dois tempos foram delimitados por riscos de referência, como mostra a Figura 3.9, concebidos por intermédio de um paquímetro de altura com ponta para traçagem. Tanto no estágio da nucleação como no processo de propagação, a condição mais crítica para o controle da pré-trinca foram os corpos de prova temperados. Na Tabela 3.4 encontram se os valores de carga para cada estágio em função da condição de tratamento térmico.

A freqüência de aplicação de carga foi crucial para confecção das pré-trincas. A condição de tratamento térmico definiu qual era a freqüência adequada para a nucleação e propagação da pré-trinca. Quanto mais frágil o comportamento do corpo de prova, menor foi a freqüência de aplicação de carga. Não houve variação de freqüência na transição do estágio de nucleação para o estágio de propagação. Um exemplo foi a condição de temperado que foi necessário uma freqüência de 10Hz na nucleação e propagação e na condição de revenido à 773K utilizou uma freqüência de 25Hz. Na Tabela 3.5 encontram também se os valores de freqüência em função da condição de tratamento térmico.

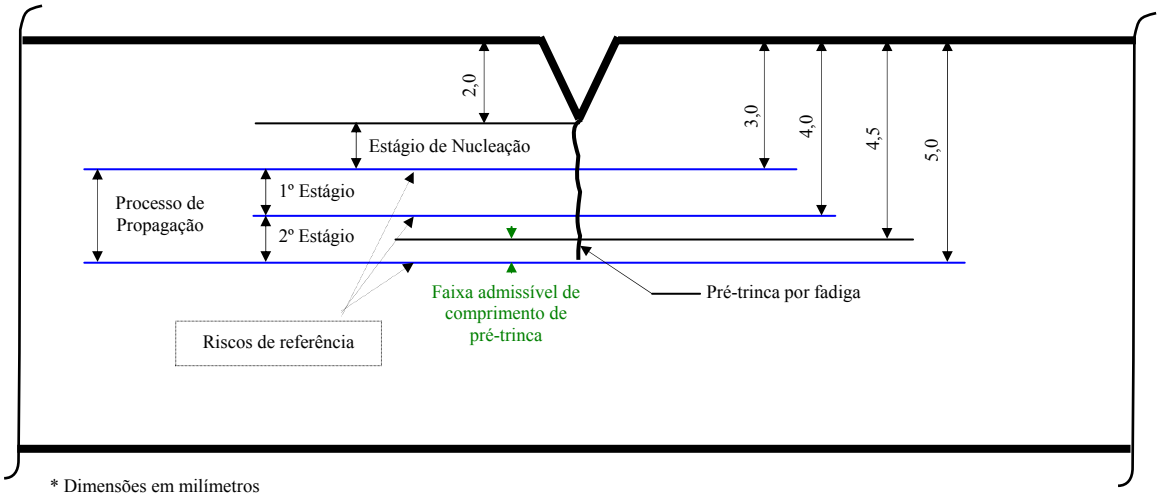


Figura 3.9 - Representação esquemática dos comprimentos dos estágios da pré-trinca e a faixa recomendável para o comprimento final.

Tabela 3.4 - Valores de carga aplicada e freqüência utilizada nos estágios em função da condição de tratamento térmico.

		Cargas Aplicadas P_{max} | P_{min} [N]			Freqüência [Hz]
		Estágio de Nucleação	Processo de Propagação		
			1º Estágio	2º Estágio	
Condição de Tratamento Térmico	Como temperado	4500 | 450	3000 | 300	2000 | 200	10
	Revenido 473K	5000 | 500	4000 | 400	3000 | 300	15
	Revenido 573K	5000 | 500	4000 | 400	3000 | 300	20
	Revenido 673K	5000 | 500	4000 | 400	3000 | 300	25
	Revenido 773K	6000 | 600	4500 | 450	3000 | 300	25

3.3.3 Ensaios Mecânicos

a) Ensaio de dureza

O objetivo das medidas de dureza foi monitorar a eficácia dos tratamentos térmicos, portanto a cada ciclo térmico era avaliada a dureza a partir da média aritmética de cinco medidas sobre a superfície com a presença do entalhe de cada corpo de prova. As medidas de dureza foram efetuadas em um durômetro Pantec modelo RBS motorizado, com carga nominal 150 kgf e pré-carga de 10 kgf e temperatura ambiente. Os procedimentos de ensaio de dureza foram seguidos conforme a norma ASTM E18. A escala de dureza utilizada foi a Rockwell C.

b) Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos em temperatura ambiente numa máquina servohidraúlica da marca MTS, modelo 810, equipada com célula de carga com capacidade de 10 toneladas. A carga foi aplicada a uma velocidade de deslocamento do pistão da ordem de 10^{-2} mm/s. O alongamento foi medido através de uma extensômetro MTS, modelo 632.24C-50**,** comprimento útil de 25 mm, fixado nos corpos de prova. O software TestStar II obteve os pontos de deformação e carga e gerava-se uma planilha Excel para que cálculo e plotagem da curva tensão em função da deformação.

Foram realizados no mínimo três corpos de prova para cada condição e as propriedades mecânicas obtidas representam uma média dos resultados. As propriedades mecânicas de tração, limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (σ_r) e estricção (φ%) foram determinadas conforme a norma ASTM E08M. A Figura 3.10 mostra a montagem experimental utilizado no ensaio de tração.

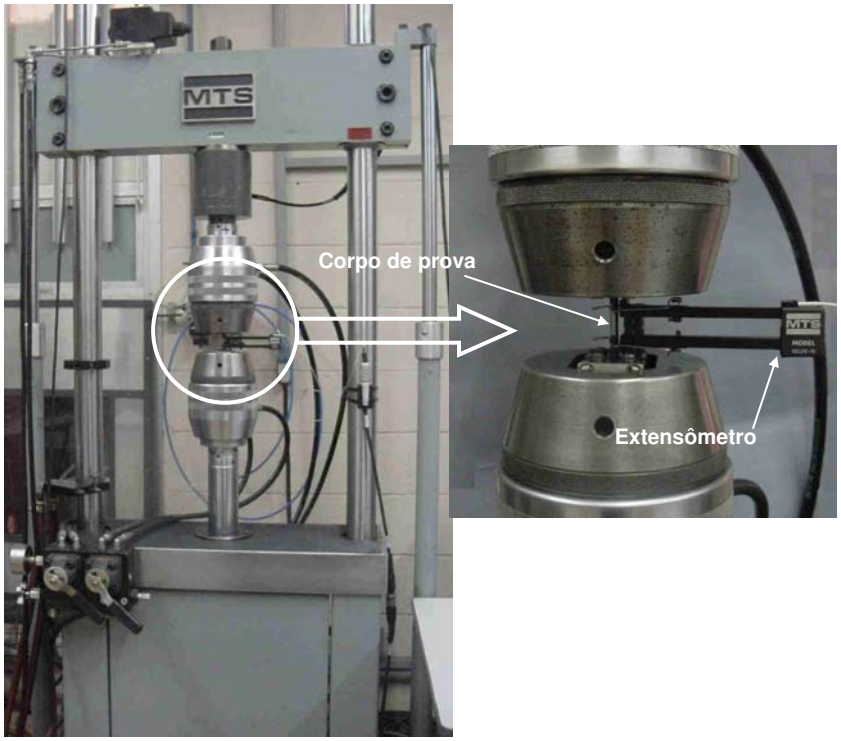


Figura 3.10 – Montagem experimental para o ensaio de tração.

c) Ensaio de flexão em três pontos com carregamento monotônico

Os ensaios de flexão com corpo de prova apoiado em três pontos foram realizados em temperatura ambiente em uma máquina MTS modelo 810 (10t.) com o software TestStar II para controle da máquina e aquisição dos dados. Foram realizados três ensaios para cada condição de entalhe e respectivamente em cada condição de tratamento térmico. Os procedimentos para realização dos ensaios de flexão foram observados na norma ASTM E399. A Figura 3.11 mostra a representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos. Na Figura 3.12 está apresentada a montagem experimental do ensaio de flexão.

Durante o ensaio de flexão em três pontos, o deslocamento de abertura da trinca (CMOD) foi medido a partir de um *Clip on gage* MTS modelo 632.03C-20 com abertura inicial de 12 mm. O CMOD foi plotado em função da carga aplicada.

Para a fixação do *Clip on gage* no corpo de prova foram utilizados dois dispositivos chamados *Knife edges*. Estes dispositivos foram confeccionados em aço a partir de usinagem em retífica plana universal e furadora universal. Os *Knife edges* eram aparafusados na rosca M3X5 do corpo de prova. O posicionamento dos *Knife edges* foi feito com auxílio de um gabarito que se encaixava no entalhe do corpo de prova. A Figura 3.13 mostra em detalhe a fixação dos *Knife edges* no corpo de prova.

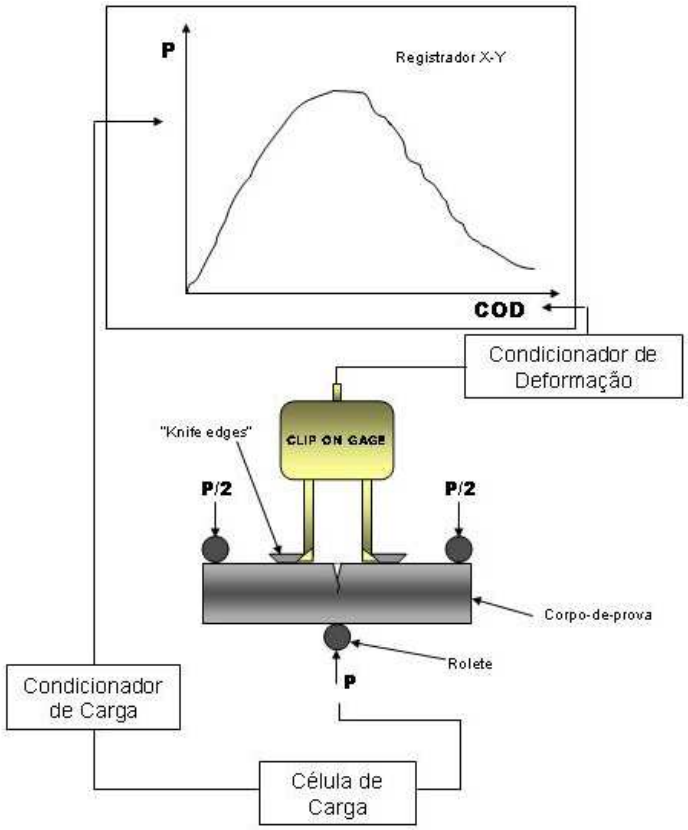


Figura 3.11 – Representação esquemática do ensaio de flexão em três pontos com carregamento monotônico.

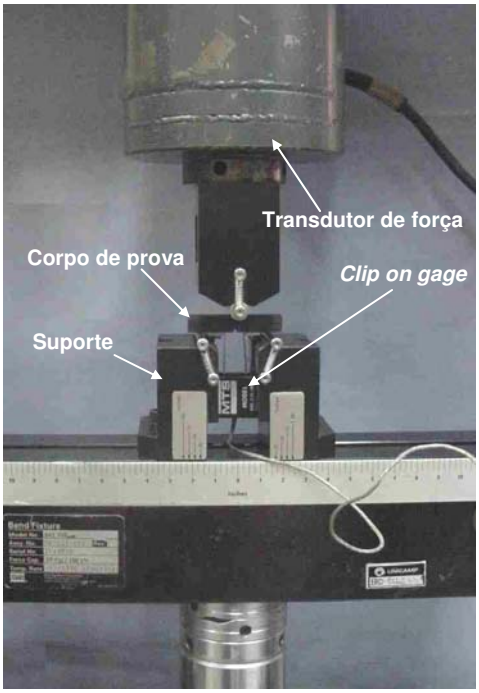


Figura 3.12 - Montagem experimental para o ensaio de flexão em três pontos.

d) Ensaio de imp

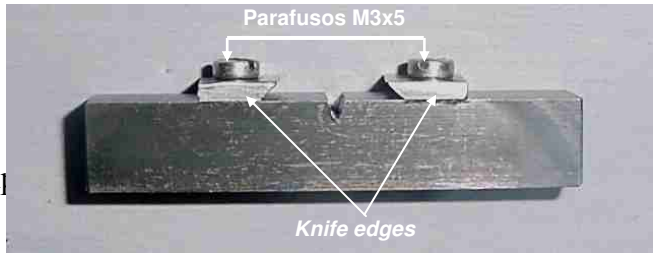


Figura 3.13 - Detalhe a fixação dos *Knife edges* no corpo de prova.

Os ensaios de impacto foram realizados em temperatura ambiente numa máquina convencional Charpy com capacidade de 300 Joules, marca Heckert, modelo 423/18 e velocidade de impacto de 5,40 m/s. Foram realizados cinco ensaios por condição ensaiada.

Foi implementado na máquina convencional o sistema de medida do ensaio de impacto Charpy instrumentado, desenvolvido no Laboratório GC3M e o Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

O sistema de medida do ensaio Charpy instrumentado foi constituído de um transdutor de força (cutelo instrumentado), condicionador de sinais dinâmico, osciloscópio digital de memória e o computador para tratamento dos resultados. A Figura 3.14 ilustra de maneira esquemática a arquitetura de medida. Todos os procedimentos adotados para montagem da arquitetura de medida do ensaio de impacto Charpy instrumentado estavam em conformidade com a norma ISO 14.556.

Para a montagem do transdutor de força, um novo cutelo foi fabricado com as características geométricas semelhantes ao cutelo do martelo pendular original da máquina de ensaio de impacto convencional. A transformação do cutelo no transdutor de força consistiu na aplicação de dois extensômetros elétricos (*strain gages*) ativos e mais dois extensômetros de compensação aplicados em uma peça do mesmo material do cutelo e isenta das vibrações causadas pelo impacto. Para esta aplicação foram selecionados *strain gages* da marca Kyowa modelo KFG-3-350-C1-11-L3M2R, de resistividade 350Ω±0,4, e fator de sensitivo de 2,10. A ligação entre os quatros extensômetros (dois ativos e dois compensadores) formou-se uma ponte completa ou de *Wheatstone*.

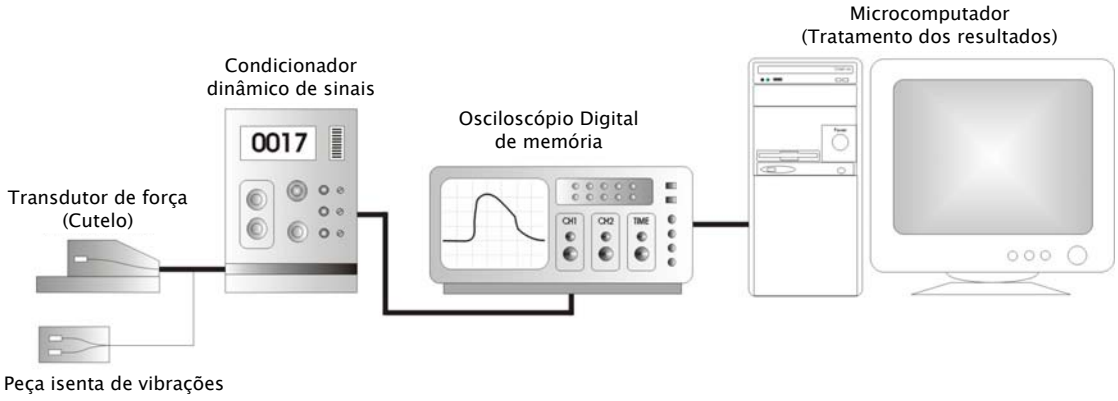


Figura 3.14 - Representação esquemática do sistema de medida do ensaio de impacto Charpy instrumentado.

A norma ISO recomenda uma distância de 13 a 15 mm entre o centro dos extensômetros e a superfície de impacto, além disso, que o local de colagem esteja protegido contra qualquer dano para os extensômetros. Para assegurar a integridade dos extensômetros, foram feitas algumas alterações geométricas no novo cutelo. Dois rasgos foram usinados em lados opostos de 2,0mm de profundidade e 7,0mm de largura, próximo 4,5mm à região de impacto, para locar os extensômetros e os cabos de ligação. A Figura 3.15 mostra detalhes do novo cutelo fabricado e a local de colagem dos *strain gages*.

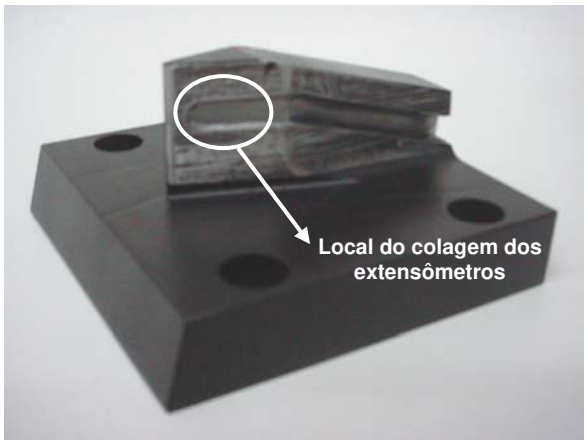


Figura 3.15 – Cutelo desenvolvido para colagem dos extensômetros.

Após a colagem dos extensômetros, o transdutor de força foi posicionado no martelo pendular da máquina de teste e calibrado. A calibração foi feita com o auxílio de um bloco padrão, recomendado pela ISO, e aparatos de suporte para aplicação de carga. O bloco padrão foi posicionado no local do corpo de prova, o cutelo montado no martelo pendular foi encostado no bloco padrão e aplicava-se a carga conhecida na face oposta do martelo. Foram efetuados cinco ensaios de calibração, cada qual contendo nove medidas de carregamento e descarregamento do transdutor de força, para verificar a repetibilidade dos resultados, em face dos esforços aplicados e a linearidade da resposta dos extensômetros utilizados como elementos sensitivos.

O condicionador de sinais foi o equipamento de excitação e leitura do sinal de tensão proveniente do transdutor de força. Sua função principal era amplificar o sinal de resposta do transdutor de força. Esta amplificação dependia intrinsecamente do ganho que o aparelho oferece. O equipamento foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. As principais características do equipamento foram

a facilidade na operação, atendia a especificação da norma ISO 14.556 e desenvolvido para medir altas taxas de deformação com o elementos resistivos.

Durante os testes iniciais do condicionador foi observado que o ganho estava relacionado com a resposta em freqüência do equipamento. Portanto foi feita a calibração dinâmica do condicionador de sinais com o objetivo de determinar qual era a resposta em freqüência em função do ganho do aparelho, ou seja, qual a curva de resposta do condicionador. O resultado obtido era para um ganho de 200 vezes a resposta em freqüência do condicionador foi aproximadamente de 200kHz.

O osciloscópio digital foi utilizado para digitalização em alta velocidade do sinal voltagem-tempo e armazenamento em uma memória do tipo RAM. O osciloscópio e o computador eram interligados por uma interface serial RS-232. O computador procedia a leitura e o tratamento numérico do sinal, por meio de uma rotina computacional dedicada. Esta rotina foi desenvolvida por Roger (2001) e Nogueira (2006) em linguagem *Matlab 6.0* e dividida em blocos de programação: o bloco de aquisição do sinal armazenado no osciloscópio e bloco de processamento do sinal. Cada bloco era composto por um conjunto de comandos na linguagem *Matlab*. A Figura 3.16 mostra a arquitetura de medida instalada na máquina de ensaio de impacto Charpy.

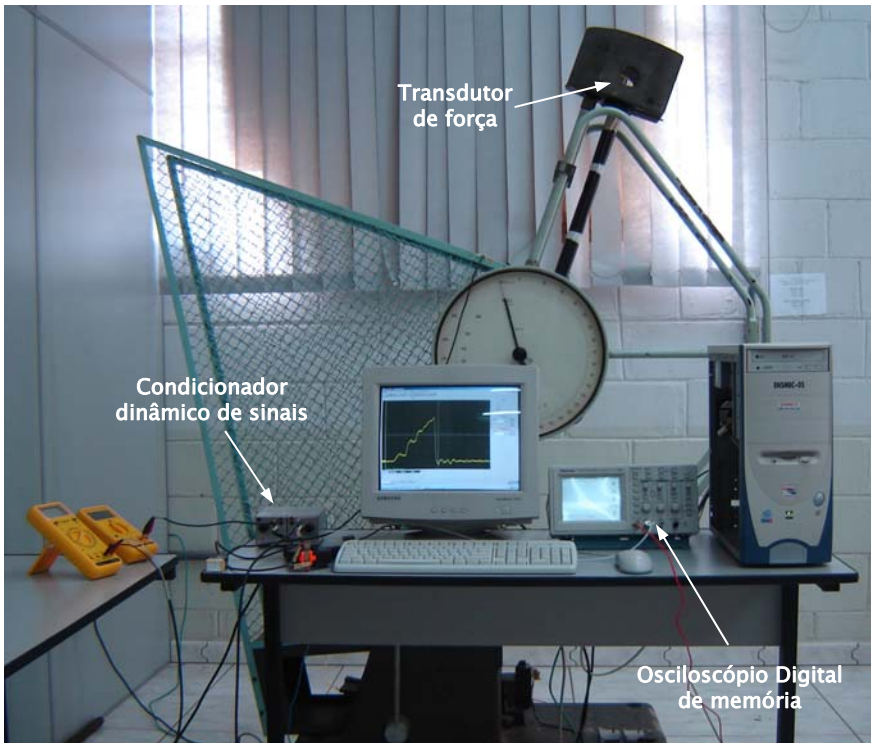


Figura 3.16 – Arquitetura de medida instalada na máquina de ensaio de impacto Charpy convencional.

3.3.4 Procedimentos na determinação do fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id}

Como apresentado anteriormente, os pesquisadores Kalthoff (1985) e Kobayashi et al. (1993), propuseram ferramentas capazes de gerar resultados do fator de intensidade de tensão dinâmico para aplicação em engenharia. Os pesquisadores avaliaram o fator de intensidade de tensão dinâmico em corpos de prova com pré trinca a partir de máquinas de ensaio de impacto convencional munidas de um sistema de instrumentação. Ambas as metodologias propostas pelos pesquisadores foram implementadas neste trabalho. O objetivo foi unir as duas ferramentas e através de rotinas computacionais determinar o fator de intensidade de tensão dinâmico a partir dos resultados do ensaio de impacto Charpy convencional munido do sistema de instrumentação desenvolvido em corpos de prova pré trincados.

Incialmente os resultados do ensaio de impacto instrumentado eram filtrados a partir do método da Média Móvel. O objetivo era eliminar os ruídos dos sinal sem comprometer as infomrações do ensaio. Em seguida, foi determinar os prinicpais esforços para a caracterização do processo de fratura por impacto e para a determinação do fator de intensidade de tensão dinâmico. Selecionou-se dois esforços do processo de fratura, a força de inicação de trinca e a força máxima. Os procedimentos na determinação da força de iniciação de trinca fundamentaram-se na aplicação da metodologia da Taxa da alteração da flexibilidade proposta por Kobayashi et al. (1993) e descrita no item 2.4 do Capítulo 2. No caso da força máxima, o valor era obtido diretamente da curva de impacto instrumentado. Rodrigues (2001) implementou a metodologia de Kobayashi em uma rotina computacional que foi utilizada neste trabalho.

Diante dos resultados dos esforços, selecionou o método de Kalthoff é largamente utilizado no contexto mundial. O pesquisador utiliza o tempo necessário para o início de fratura, obtido a partir de extensômetros elétricos e um sensor magnético posicionados no corpo de prova, e a curva de reposta ao impacto e assim obtém o fator de intensidade de tensão dinâmico. No presente trabalho não foi utilizado sensores resistivos ou magnéticos para obter o tempo de fratura, entretanto a aplicação da medotologia de Kobayashi possibilitou determinar a força necessária para iniciação de trinca e a força máxima e assim encontrar os tempos envolvidos para cada esforço determinado.

De posse dos tempos envolvidos na força de iniciação de trinca e força máxima, bastava consultar o valor de K_{Id} na curva de resposta ao impacto no respectivo tempo. Esse procedimento

está claramente apresentado na Figura 2.2 do Capítulo 2. A determinação da curva de resposta ao impacto é uma das dificuldades do método de Kalthoff. Ela representa a reação elástica entre o sistema corpo de prova e martelo em cada condição de ensaio pré-estabelecida. O pesquisador sugere algumas metodologias experimentais para determinar a curva de resposta ao impacto e aproximações numéricas conforme descritas no item 2.3 do Capítulo 2 – Revisão da Literatura. No presente trabalho foi desenvolvida uma rotina computacional com as aproximações numéricas de Kalthoff para determinar a curva de resposta ao impacto. A rotina computacional desenvolvida encontra-se no Anexo 1.

Em resumo, o K_{Id} foi determinado a partir de duas metodologias distintas que basecamente compreendeu em determinar o valor de força, assim retornar na curva força em função do tempo obtido no ensaio de impacto instrumentado e determinar o tempo correspondente. Gerar a curva de resposta ao impacto e encontrar o valor de K_{Id} para tempo corresponde ao valor de força determiando. Na Figura 3.17 é apresentado o esquema das metodologias de cálculo do fator de intensidade de tensão dinâmico utilizadas neste trabalho.

Além a medotodogia descrita, foi adotado neste trabalho também duas metodologias baseadas em correlações com a energia global absorvida e adotado a norma ASTM E399 para cálculo do fator de intensidade de tensão dinâmico. Foi utilizado as correlações com energia global absorvida propostas por Barson (1975) e Sailors-Corten (1972).

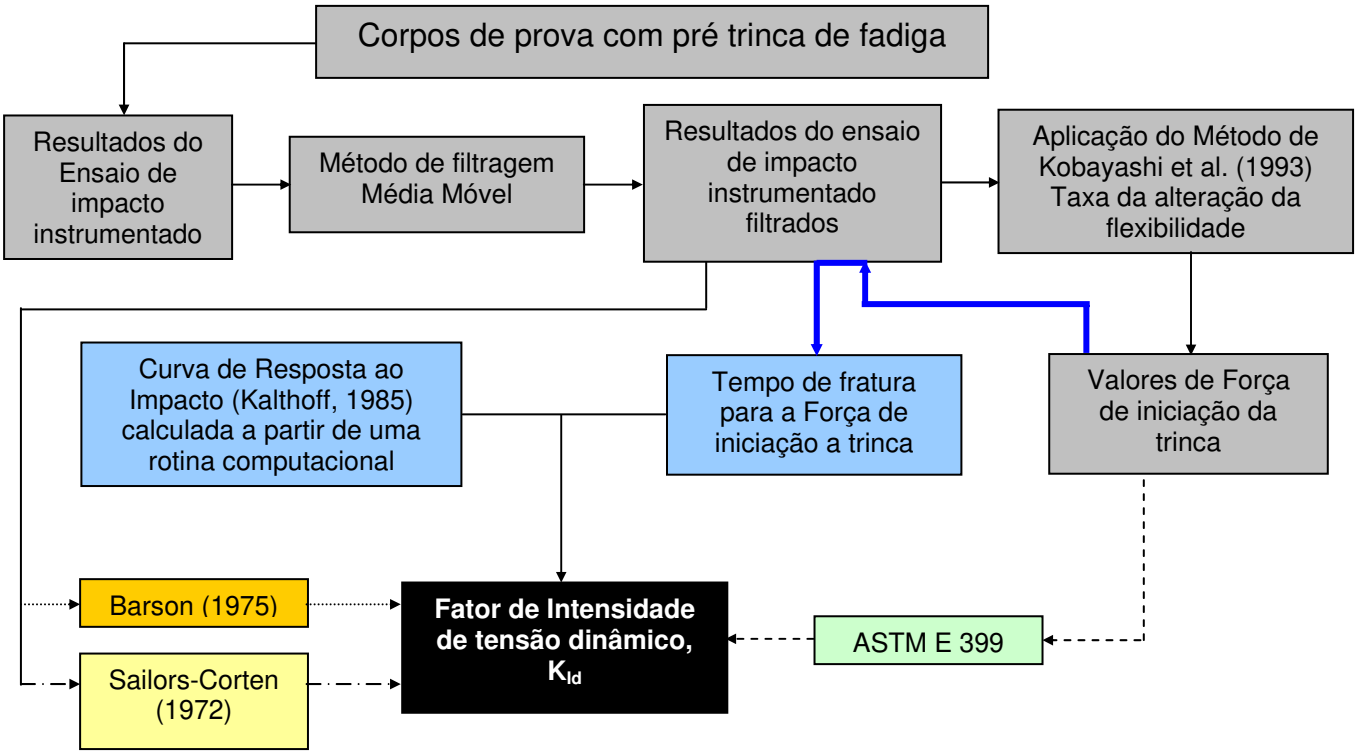


Figura 3.17 - Esquema para a determinação do fator de intensidade de tensão dinâmico a partir dos resultados de força de iniciação da trinca.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1 Considerações Iniciais

Os resultados e a discussão dos resultados deste trabalho foram concentrados na caracterização mecânica do material ensaiado a partir dos resultados obtidos no sistema de medida de impacto instrumentado desenvolvido para o ensaio Charpy convencional. Os resultados da caracterização mecânica foram fundamentais para avaliar o comportamento do sistema de medida diante de processos de fratura com diferentes tempos de duração. Foram ensaiadas condições microestruturais do aço ABNT 4340, obtidas a partir das condições de como temperado e revenido a 473K, 573K, 673K e 773K , e dois tipos de entalhes, arredondado e pré-trinca por fadiga.

Inicialmente foram realizados ensaios de dureza e tração e análise química. O objetivo desses ensaios preliminares foi analisar se realmente se tratava do material selecionado e avaliar se as propriedades mecânicas fundamentais estavam satisfatórias diante dos ciclos térmicos impostos. Pode-se observar que com o aumento da temperatura de revenido houve, como esperado, houve um aumento sobre a tenacidade, salvo a condição de 573K.

Depois da determinação das propriedades mecânicas fundamentais, realizaram-se os ensaios de impacto e ensaios monotônicos. Os valores de energia global absorvida, resultado clássico do ensaio de impacto convencional, foram utilizados na análise preliminar do sistema de medida de impacto instrumentado. O objetivo foi comprovar se o sinal obtido no ensaio de impacto era

realmente representativo do fenômeno de fratura. Desta forma, foi comparado as energias globais obtidas pela integração numérica da curva de carga de impacto em função do deslocamento com a energia global lida diretamente no indicador da máquina de impacto convencional e os valores de energia global dos ensaios monotônicos. Recorreu-se a tal expediente para se avaliar o grau de influência dessas taxas de carregamento no processo de fratura. Na essência a expectativa era se a influência da taxa não fosse tão expressiva os parâmetros de fratura determinados para o ensaio monotônico poderiam ser utilizados de forma comparativa com os parâmetros determinados no ensaio de impacto para ajudar a avaliar a eficácia do sistema de instrumentação e a qualidade do tratamento do sinal dinâmico capturado durante a fratura por impacto. Nesta análise tomou-se como referência o resultado de energia global obtido no indicador da máquina de impacto convencional, por ser uma grandeza obtida mecanicamente a partir da diferença de energia potencial do martelo pendular.

A análise comparativa estendeu-se também aos resultados de energias globais obtidas por Nogueira(2006). O pesquisador estudou a influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo de fratura do aço estrutural ABNT 4340. Nogueira realizou ensaios dinâmicos em uma máquina Charpy instrumentada modelo PW30 da Instron Wolpert do Departamento de Materiais, Automobilística e Aeronáutica da EESC – USP.

Além da comparação inicial dos valores das energias globais, recorreu-se também à comparação dos parâmetros de mecânica da fratura obtidos a partir das curvas características do processo de fratura tanto para carregamento monotônico como para o carregamento por impacto. Os valores de tenacidade à fratura para carregamento monotônico foram determinados a partir dos procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E399.

Para os ensaios de impacto, os parâmetros de tenacidade à fratura dinâmica foram obtidos de três diferentes maneiras, a partir:

- dos valores da energia global;
- dos procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E399. Neste caso, recorreu-se à rotina computacional desenvolvida por Rodrigues (2001), para determinação dos esforços envolvidos no processo de fratura e utilizados na determinação da tenacidade à fratura;
- da metodologia proposta por Kalthoff que toma como base a curva de resposta ao impacto (*Impact Response Curve*).

4.2 Ensaio de Dureza

Os valores de dureza apresentados na Tabela 4.1 representam as médias e os desvios padrão apurados para as diferentes condições de tratamento térmico. Observa-se pelos valores dos desvios padrão que a dispersão é pequena e os valores médios de dureza compatíveis com os apresentados na literatura.

Como mostrado na Tabela 4.1 e Figura 4.1, a dureza cai com o aumento da temperatura de revenido. Isto em decorrência da precipitação dos carbonetos e a conseqüente diminuição do endurecimento por solução sólida. Com o amolecimento da matriz poder-se-ia esperar o aumento da ductilidade e da tenacidade. Todavia, isto não ocorre em virtude do bem sabido e conhecido fenômeno da fragilização da martensita revenida.

O amolecimento da matriz sugere um aumento na ductilidade e conseqüentemente da tenacidade, isso não ocorre devido à fragilização da martensita revenida.

Tabela 4.1 – Valores de dureza resultantes dos diferentes tratamentos térmicos utilizados neste trabalho.

Condição de Tratamento Térmico		**Dureza HRC**
Como-temperado		**59,1 (0,9)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**56,4 (0,2)**
	573	**52,7 (0,3)**
	673	**47,9 (0,3)**
	773	**43,2 (0,2)**

*Desvio Padrão

4.3 Ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração estão apresentados na Tabela 4.2. Essa tabela mostra valores médios e desvios padrão das propriedades mecânicas: limite de resistência à tração (σ_t), limite de escoamento (σ_e) e redução de área (φ%). Os resultados do ensaio de tração,

representados pelos valores médios e desvios padrão, estão mostrados na Tabela 4.2 para as seguintes propriedades mecânicas: Limite de resistência à tração, limite de escoamento e redução de área.

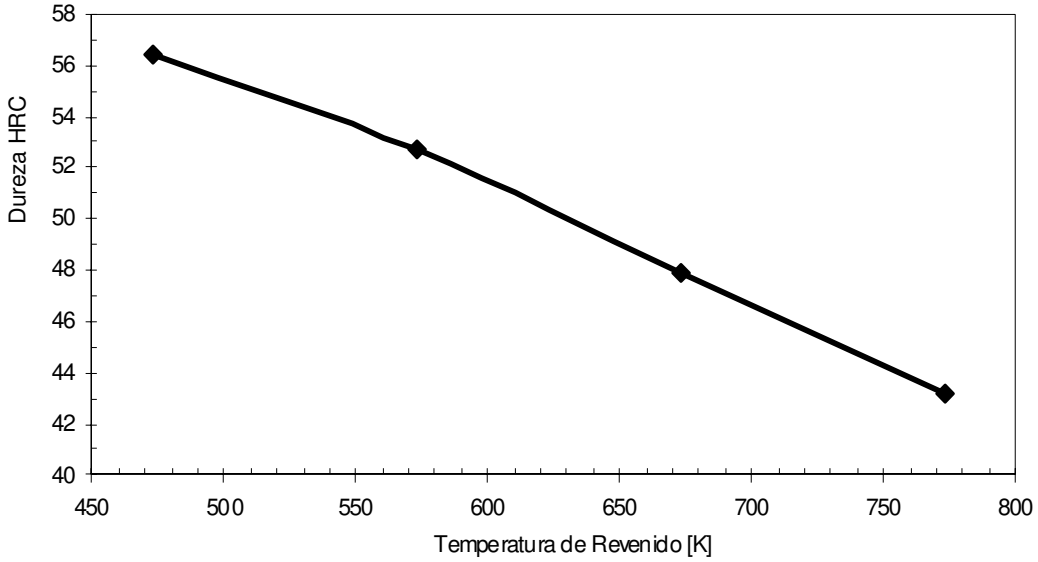


Figura 4.1 – Curva dureza Rockwell na escala C em função da temperatura de revenido para as condições ensaiadas.

O limite de resistência apresenta comportamento análogo ao da dureza, o limite de escoamento é baixo na condição como-temperado e aumenta inicialmente com a temperatura de revenido e depois diminui.

Devido ao amolecimento da matriz (diminuição da dureza) com o aumento da temperatura de revenido, era de se esperar que a ductilidade ($\varphi\%$) aumentasse continuamente com essa temperatura. Entretanto, esta propriedade apresentou um comportamento anormal em função da temperatura de revenido. A ductilidade, conforme apresentado na Tabela 4.2, com o aumento da temperatura de revenido, inicialmente aumenta, depois diminui, e posteriormente torna a aumentar.

A análise fractográfica nos corpos de prova de tração mostrou uma alteração do modo de fratura de intergranular na condição de como-temperado para microcavidades nas condições de revenido. Todavia, pequenas regiões de fratura intergranular foram observadas nas condições de revenido, porém devido ao aumento da temperatura de revenido essas regiões foram diminuindo prevalecendo essencialmente a fratura por microcavidades. A Figura 4.3 mostra a superfície de

fratura da condição de como-temperado e a Figura 4.4 mostra a superfície de fratura do corpo de prova revenido a 773K.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração.

Condição de Tratamento Térmico		Limite de resistência à tração σ_t [MPa]	Limite de escoamento σ_e [MPa]	Estricção [φ%]
Como-temperado		**2178 (72)***	**1886 (66)***	**7,9 (3,8)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**2084 (31)**	**1725 (24)**	**24,1 (2,4)**
	573	**1847 (52)**	**1687 (68)**	**29,1 (4,5)**
	673	**1602 (29)**	**1513 (42)**	**23,8 (3,1)**
	773	**1363 (17)**	**1311 (19)**	**24,1 (2,1)**

*Desvio Padrão

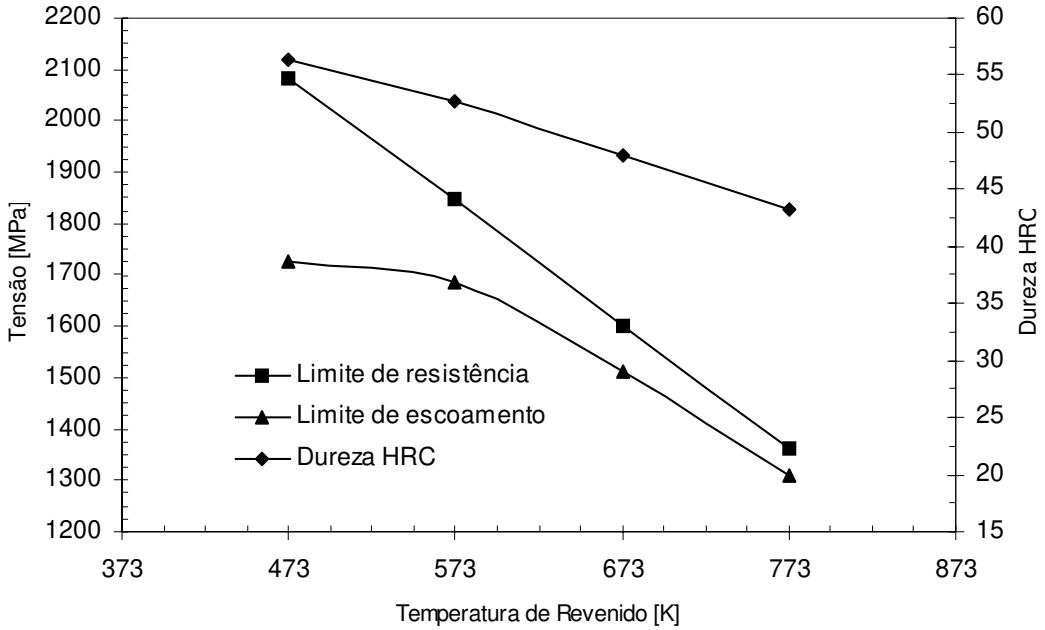
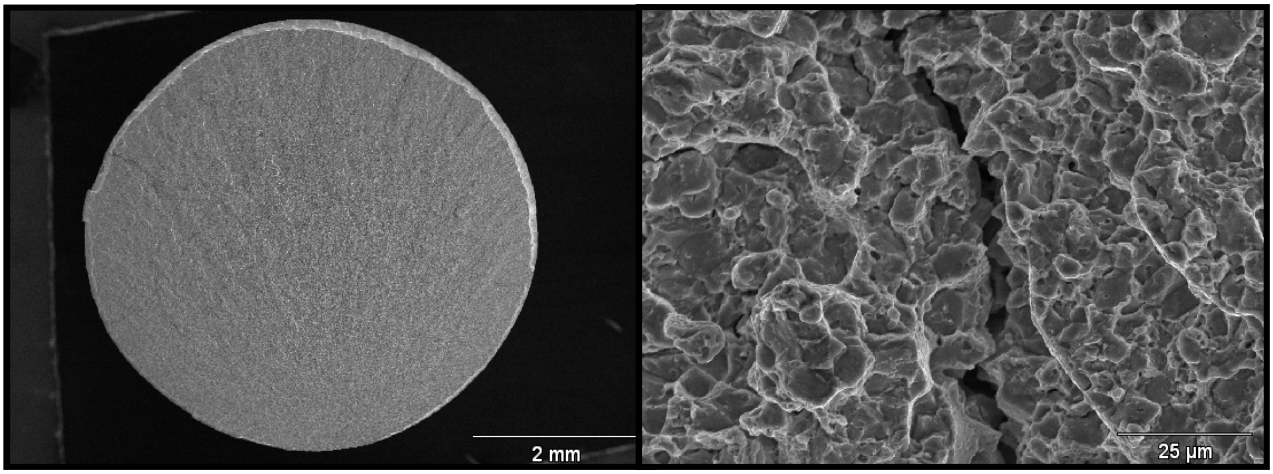
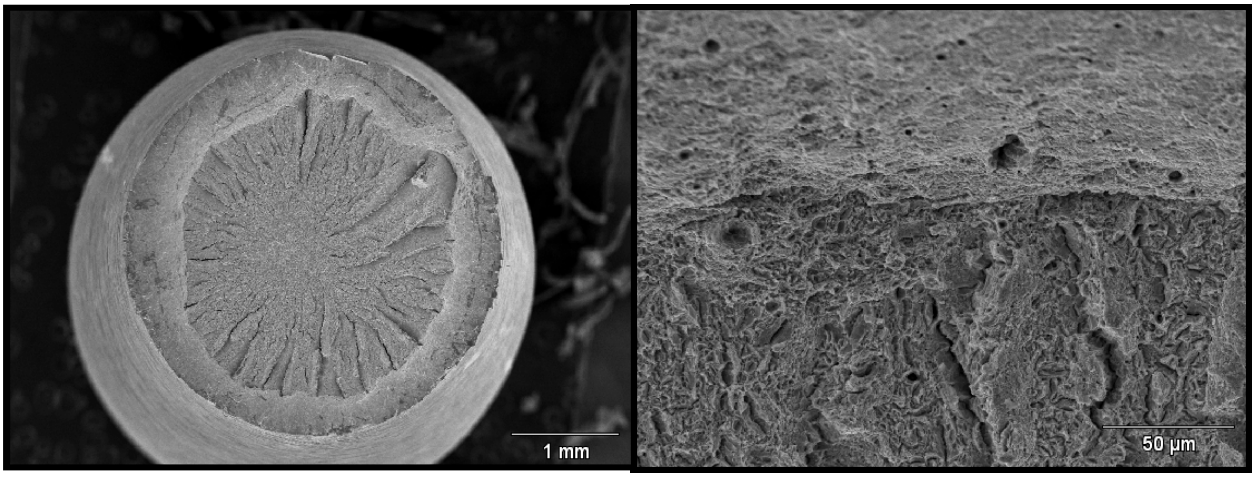


Figura 4.2 – Curvas limite de escoamento, limite de resistência e dureza em função da temperatura de revenido.



(a) (b)

Figura 4.3 – Aspecto da superfície de fratura do corpo-de-prova de tração na condição de como-temperado / modo de fratura: intergranular.



(a) (b)

Figura 4.4 – Aspecto da superfície de fratura do corpo-de-prova de tração na condição de R7 (revenido a 773K) / modo de fratura: microcavidades.

4.4 Ensaio de Tenacidade à Fratura – Carregamento monotônico

Os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura com carregamento monotônico foram utilizados como valores de referência na análise comparativa com os valores obtidos para esta propriedade nos ensaios de impacto. As curvas carga em função do deslocamento obtidas no ensaio monotônico *(curva monotônica)* são bem comportadas e isentas de sinais interferentes como ruídos e ondas de choque. Tais sinais interferentes, sempre presentes em ensaios de

impacto, distorcem em demasia a curva característica do processo de fratura o que acaba por comprometer em muito a qualidade dos parâmetros determinados.

Os esforços determinados foram a força de iniciação de trinca e a força máxima. Os esforços determinados para o calculo da tenacidade a fratura foram a força de inicio de propagação de trinca e a força máxima. A determinação da força máxima é trivial. Basta pegar o maior valor algébrico. Porém, a determinação da força de inicio de propagação de trinca é muito complexa. Recorreu-se a duas metodologias para sua determinação. Uma das metodologias recorreu à taxa de variação da flexibilidade estabelecida por Yamamoto et al. (*Complice Change Rate*). Todavia, como a taxa de variação da flexibilidade é complexa e não trivial, recorreu-se a outra técnica que tomou como base o conceito da carga P_5 estabelecida pela norma ASTM E399 para a determinação de P_Q.

Na Tabela 4.3 estão apresentados os valores da força de iniciação de trinca para as diferentes condições microestruturais e de severidade de entalhe. Para os corpos de prova pré-trincados são apresentados dois resultados de iniciação de trinca, um obtido pelo método da taxa de variação da flexibilidade e o outro pelo conceito da carga P_Q.

Tabela 4.3 – Valores de força de iniciação de trinca, em kN, para as condições microestruturais e severidades de entalhe.

Condição de Tratamento Térmico		**Ensaio Monotônico**		
		Força de Iniciação de Trinca [kN]		
		Entalhe com pré trinca de fadiga		**Entalhe arredondado**
		F_{iuMP}	**P_5**	**F_{iuMA}**
Como-temperado		**2,2 (0,3)***	**3,9 (0,7)***	**9,9 (1,3)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**3,0 (0,5)**	**4,9 (0,5)**	**24,8 (6,3)**
	573	**3,7 (0,1)**	**5,4 (0,5)**	**16,6 (2,8)**
	673	**7,1 (0,6)**	**8,6 (0,3)**	**25,4 (0,3)**
	773	**10,0 (0,2)**	**10,1 (0,5)**	**25,0 (0,6)**

*Desvio Padrão

Diferentemente dos valores da força de iniciação de trinca, os valores de força máxima foram relativamente fáceis de serem obtidos. Bastou encontrar na curva carga em função do deslocamento o maior valor de carga. Assim, obtidos, foram tratados estatisticamente para cada condição microestrutural e tipo de entalhe. Na Tabela 4.4 estão apresentados os resultados de força máxima.

Tabela 4.4 – Valores de força máxima, em kN, para as condições microestruturais e severidades de entalhe.

Condição de Tratamento Térmico		**Ensaio Monotônico**	
		Força Máxima [kN]	
		Entalhe com pré trinca de fadiga F_{mMP}	**Entalhe arredondado F_{mMA}**
Como-temperado		**4,2 (0,2)***	**14,0 (0,9)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**5,0 (0,4)**	**31,5 (0,8)**
	573	**5,2 (0,5)**	**28,5 (1,0)**
	673	**8,8 (0,2)**	**27,6 (0,3)**
	773	**10,7 (0,6)**	**26,3 (0,8)**

*Desvio Padrão

Foi elaborado um estudo do fator de intensidade de tensão, K_Q, a partir dos resultados dos corpos de prova com pré trinca de fadiga. Na Tabela 4.5 estão apresentados, para cada condição analisada, os valores médios e os desvios padrão de K_Q, determinados a partir dos procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E-399. Encontra-se também nesta tabela uma avaliação, com base na Equação 4.1, se o valor apurado de K_Q efetivamente representa o valor de tenacidade à fratura sob condição de deformação plana, K_{IC}.

$$B, a \geq 2{,}5\left(\frac{K_Q}{\sigma_e}\right)^2 \tag{4.1}$$

na qual B é a espessura (10 mm), *a* é o comprimento da pré-trinca variável conforme o corpo-de-prova e σ_e o limite de escoamento. Se a inequação for satisfeita, significa que o valor de K_Q é igual a K_{IC}. Na Figura 4.5 está apresentado o gráfico de K_Q em função da temperatura de revenido e as respectivas fractografias.

Tabela 4.5 – Valores de K_Q e a relação entre K_Q e K_{IC} das condições analisadas.

Condição de Tratamento Térmico		**Ensaio monotônico em corpos de prova com pré trinca de fadiga**		**Limite de Escoamento [MPa]**
		Candidato a tenacidade à fratura K_Q [$MPam^{1/2}$]	**Relação entre K_Q e K_{IC}**	
Como-temperado		**33,7 (1,6)***	**$K_Q = K_{IC}$**	**1886 (66)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**47,4 (2,2)**	**$K_Q = K_{IC}$**	**1725 (24)**
	573	**53,5 (2,8)**	**$K_Q = K_{IC}$**	**1687 (68)**
	673	**83,1 (3,1)**	**$K_Q \neq K_{IC}$**	**1513 (42)**
	773	**100,0 (3,1)**	**$K_Q \neq K_{IC}$**	**1311 (19)**

* Desvio Padrão

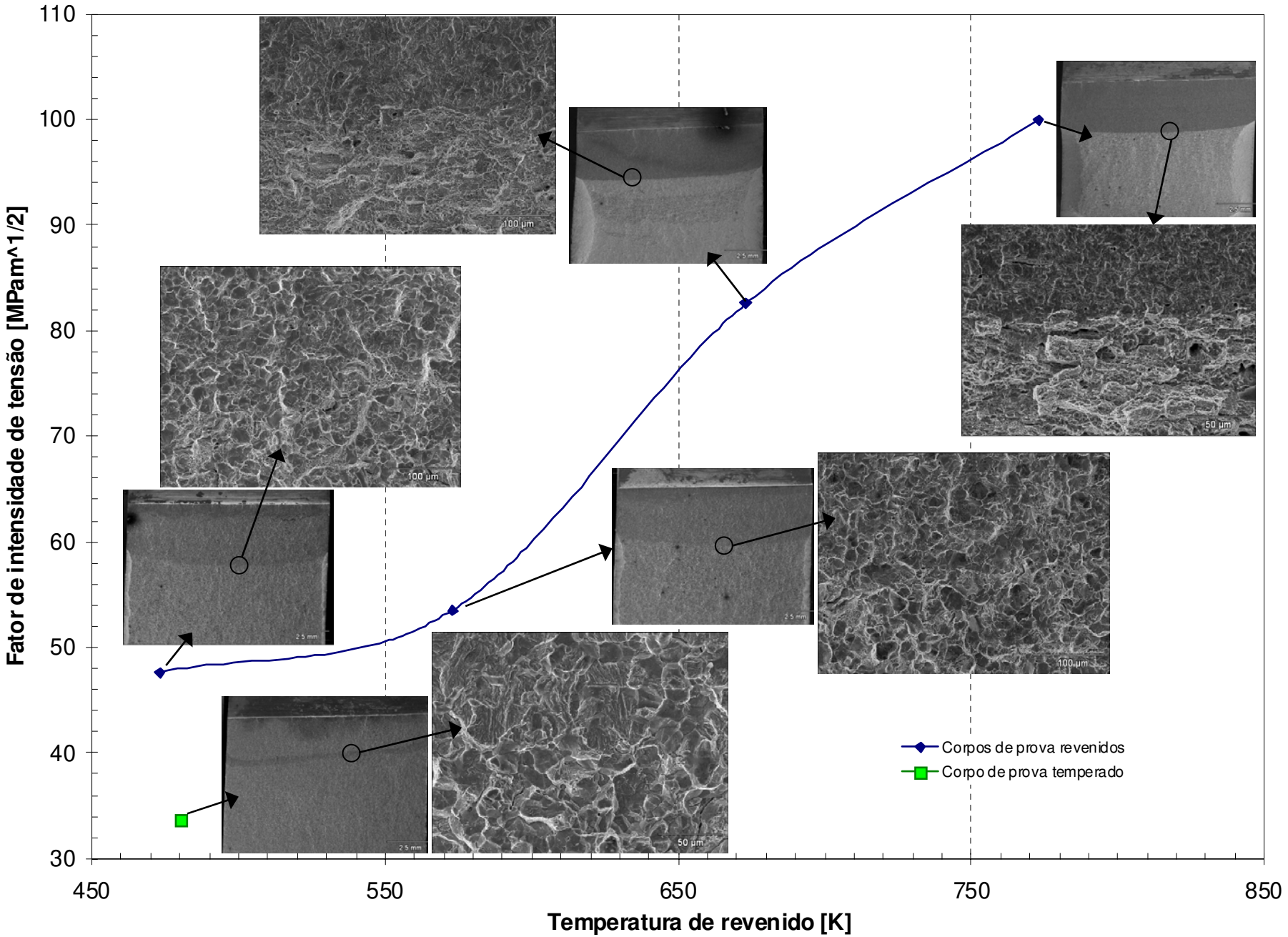


Figura 4.5 – Fator de intensidade de tensão monotônico das condições microestruturais e as respectivas fractografias.

4.5 Ensaios de Impacto Instrumentado

4.5.1 Energia global absorvida

O principal resultado clássico do ensaio Charpy é a energia necessária para deformar e fraturar o corpo de prova, chamada de energia global. Tal valor, lido diretamente no relógio indicador da máquina, corresponde à diferença da energia potencial do martelo pendular antes e após o impacto.

A energia global tem valor de uso muito limitado. Serve como parâmetro eminentemente de cunho qualitativo e em controle de qualidade. Não é utilizado de maneira quantitativa na resistência dos materiais e/ou na mecânica da fratura. Esta limitação é o principal estímulo para se instrumentar as máquinas Charpy. A instrumentação possibilita ampliar consideravelmente a quantidade de informações características do comportamento mecânico do material quando comparado com as obtidas no ensaio Charpy clássico. Com a instrumentação é possível obter a curva característica do processo de fratura por impacto, força em função do deslocamento. De posse dos valores dos esforços críticos e os fundamentos da mecânica da fratura é possível obter valores candidatos à tenacidade à fratura com carregamento por impacto.

Não obstante, no presente trabalho, os valores de energia global lidos diretamente na máquina foram extremamente importantes e serviram de parâmetro de comparação com os valores calculados a partir da integração numéricas das curvas força em função do deslocamento obtidas com a instrumentação.

Os resultados obtidos no sistema de medida eram na forma de curvas de carga de impacto em função do tempo ou do deslocamento estimado. A partir da integração numérica da curva carga de impacto em função do deslocamento determinava-se a energia global absorvida no processo de fratura. Esses valores foram comparados diretamente com os valores obtidos no relógio comparador da máquina. Assim, a proximidade dos valores da energia global obtidos destas diferentes maneiras atestaram a eficácia e a qualidade da instrumentação implementada.

Foram utilizados também os resultados de energia global de outra máquina de impacto instrumentado. Nogueira (2006) ensaiou corpos de prova em uma máquina Instron Wolpert já munida de um sistema de instrumentação e de mesma capacidade da máquina utilizada nesse

trabalho. O pesquisador ensaiou nas condições térmicas e severidades dos entalhes escolhidas nesse estudo.

Assim, para cálculo das diferenças percentuais, adotou-se como referência, a energia lida no relógio comparador da máquina. Essa energia é obtida a partir da variação de altura do martelo pendular e independe de qualquer interferência eletrônica causada por ondas de choque ou filtragem do sinal obtido.

Na Tabela 4.6 estão apresentados os valores de energia global para as condições microestruturais ensaiadas com entalhe arredondado. Na Tabela 4.7, os resultados de diferença percentual asseguram dizer que quanto mais frágil a condição microestrutural maior é a diferença percentual. No caso do corpo de prova temperado a variação da diferença percentual foi de –13 a 22%. Na Figura 4.6 foram plotados os valores de energia global dos corpos de prova com entalhe arredondado em função das temperaturas de revenido. Observou-se que nos três gráficos um comportamento semelhante entre eles, a diminuição da energia na temperatura de 573K. Esta selha, nos gráficos, está atribuído ao fenômeno da fragilização da martensita revenida.

Tabela 4.6 – Resultados de energias globais [J] obtidas a partir do processo de fratura de corpo de prova com entalhe arredondado.

Condição de Tratamento Térmico		**Ensaio de Impacto**		
		Energia absorvida Ensaio Charpy Clássico [W_D]	**Instron Wolpert Integração numérica [W_{IW}]**	**Sistema de medida de impacto instrumentado Integração numérica [W_{SMI}]**
Como-temperado		**6,0 (1,0)***	**6,8 (1,4)***	**4,7 (1,8)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**13,3 (0,5)**	**15,1 (0,5)**	**14,8 (1,8)**
	573	**10,6 (0,5)**	**12,5 (0,1)**	**11,4 (1,1)**
	673	**16,6 (1,5)**	**18,8 (1,4)**	**19,4 (0,3)**
	773	**27,6 (2,8)**	**30,1 (2,9)**	**26,6 (1,3)**

*Desvio Padrão

Tabela 4.7 – Diferença percentual entre a energia lida no relógio comparador [W_D] e as energias dos ensaios do Sistema de Medida de Impacto Instrumentado [W_{IW} e W_{SMI}], entalhe arredondado.

Condição de Tratamento Térmico		Ensaio de Impacto	
		Instron Wolpert $\frac{W_D - W_{IW}}{W_D} * 100$	**Sistema de Medida de impacto instrumentado** $\frac{W_D - W_{SMI}}{W_D} * 100$
Como-temperado		**-13**	**22**
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**-13**	**-11**
	573	**-10**	**-8**
	673	**-13**	**-17**
	773	**-9**	**-4**

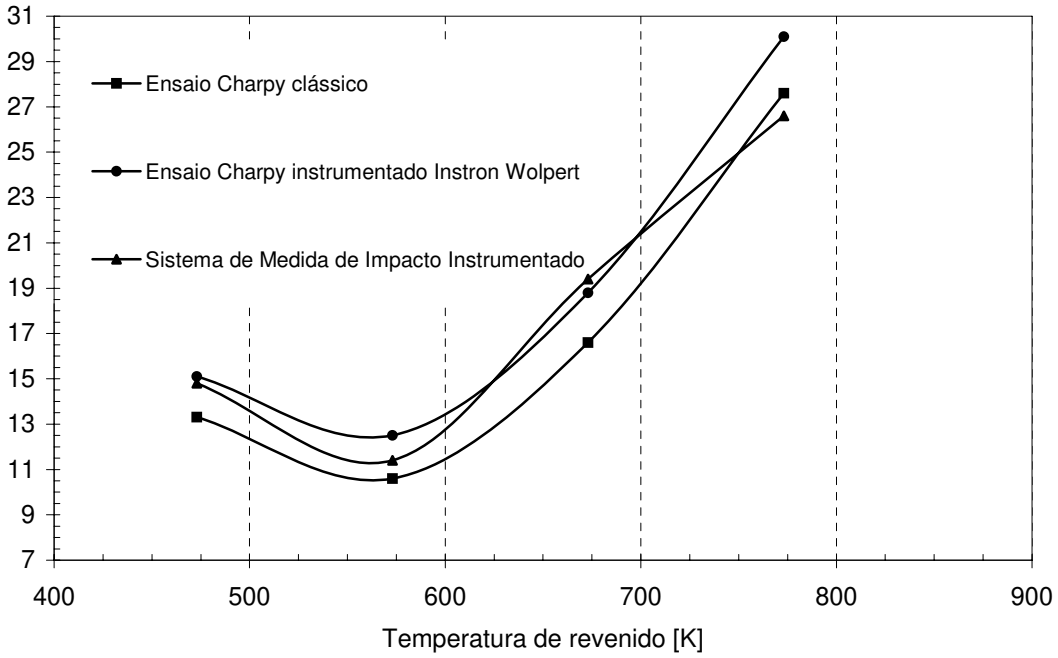


Figura 4.6 – Energia global em função da temperatura de revenido para o processo de fratura de corpos de prova com entalhe arredondado.

Análogo aos valores de energia global para as condições microestruturais ensaiadas com entalhe arredondado, foi comparado os valores de energia para os corpos de prova com pré trinca no entalhe. Na Tabela 4.8, estão apresentados os resultados de energia global das condições microestruturais em corpos de prova pré trincados. Nota-se que os valores são menores do que o

entalhe arredondado devido à área resistente ser menor e também devido à maior severidade do entalhe (maior triaxialidade de tensões). Cabe ressaltar que a variação do comprimento de pré trinca à frente do entalhe foi de 2,30 a 3,10mm.

Nota-se, na Tabela 4.9, que as diferenças percentuais da máquina Instron são bem menores que o sistema de medida de impacto instrumentado. Já era esperado essa diferença percentual, pois são dois ensaios realizados em condições de comprimento de pré trinca diferentes. Estes mostram que a presença de pré trinca interfere significativamente nos resultados de energia.

Novamente, para a condição temperado, a variação da diferença percentual foi maior que as demais condições. A variação foi -30 a 54%. Nessa condição microestrutural, temperado, houve dificuldade considerada na preparação da pré trinca o que causou grande dispersão no comprimento de pré trinca.

Na Figura 4.7 foram plotados os valores de energia global dos corpos de prova com pré trinca no entalhe em função das temperaturas de revenido. Houve uma tendência ao comportamento semelhante ao corpo de prova com entalhe arredondado, isto é, a diminuição da energia na temperatura de 573K, porém a atenuação foi devido à variação dos comprimentos de pré trinca. Nota-se que nas condições de 673K e 773K houve um aumento na energia respeitando o comportamento dútil do material.

Tabela 4.8 – Resultados de energias globais [J] obtidas a partir do processo de fratura de corpo de prova com pré trinca de fadiga.

Condição de Tratamento Térmico		**Ensaio de Impacto**		
		Energia absorvida Ensaio Charpy Clássico [W_D]	**Instron Wolpert Integração numérica [W_{IW}]**	**Sistema de Medida de impacto instrumentado Integração numérica [W_{SMI}]**
Como-temperado		**1,3 (0,5)***	**1,7 (0,1)***	**0,8 (0,1)**
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**2,0 (0,1)**	**2,3 (0,1)**	**1,0 (0,1)**
	573	**1,8 (0,1)**	**2,1 (0,2)**	**0,8 (0,1)**
	673	**2,9 (1,3)**	**2,8 (0,3)**	**1,5 (0,1)**
	773	**9,6 (0,3)**	**10,3 (0,1)**	**6,9 (0,4)**

*Desvio Padrão

Tabela 4.9 – Diferença percentual entre a energia lida no Dial [W_D] e as energias dos ensaios de impacto instrumentado [W_{IW} e W_{SMI}], em corpos de prova com pré trinca de fadiga.

Condição de Tratamento Térmico		Ensaio de Impacto	
		Instron Wolpert $\frac{W_D - W_{IW}}{W_D} * 100$	**Sistema de Medida de Impacto Instrumentado** $\frac{W_D - W_{SMI}}{W_D} * 100$
Como-temperado		**-30**	**54**
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**-15**	**50**
	573	**-16**	**55**
	673	**3**	**48**
	773	**-7**	**28**

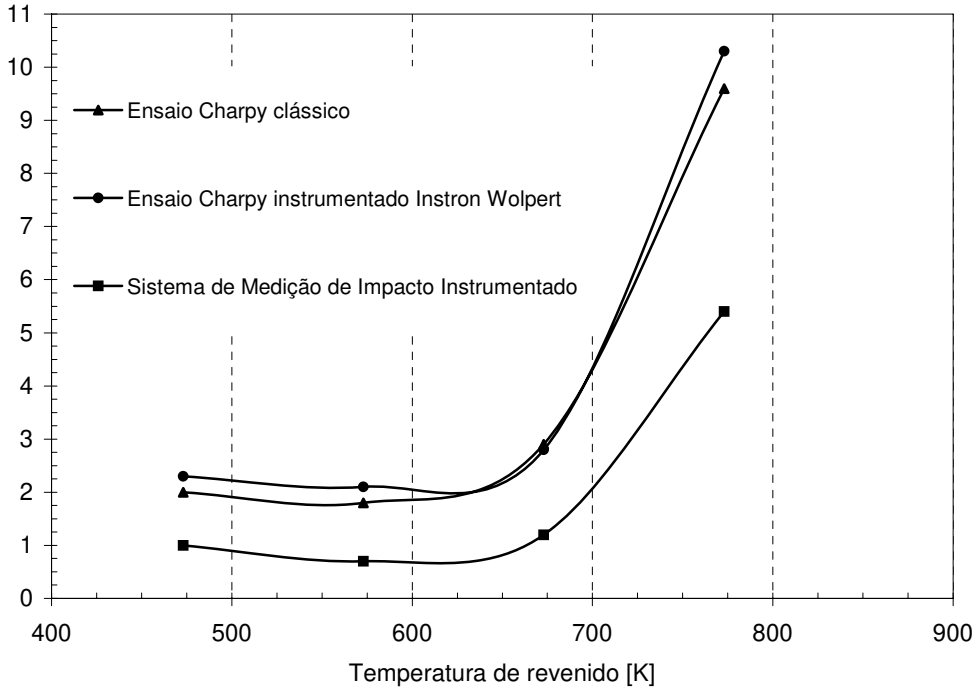


Figura 4.7 – Energia global em função da temperatura de revenido para o processo de fratura de corpos de prova com pré trinca de fadiga.

4.5.2 Tratamento do sinal capturado durante o processo de fratura por impacto.

Nos ensaios mecânicos realizados com carregamento de impacto observa-se que o processo de fratura ocorre sobre uma base de tempo muito pequena. Este foi durante muito tempo uma séria limitação a ser vencida para efetivar a instrumentação de uma máquina de ensaio Charpy. Durante a fratura por impacto as tensões e deformações sofrem variações num tempo muito curto, o que requer a utilização de instrumentação apropriada para sua medição. Durante muito tempo este foi um grande obstáculo a ser transposto. Muitos pesquisadores se depararam e descreveram os problemas a serem resolvidos e apresentaram à comunidade científica várias recomendações para a adequada instrumentação Charpy. Em 2000, compilando a partir dos vários procedimentos propostos, a International Organization Standardization publica a norma ISO 14556 que estabelece a metodologia e os requisitos mínimos aceitáveis para a adequada instrumentação da máquina Charpy.

Entre vários itens da norma, o sistema de medição requer obrigatoriamente amplificadores de sinais com resposta em freqüência acima de 100kHz, para adquirir o sinal sem atenuação. Os resultados obtidos neste trabalho confirmaram que o sistema de medida para instrumentação, utilizado neste trabalho, estava adequadamente equacionado. Este fato pode foi comprovado ao comparar os valores de energias globais obtidas pelo relógio comparador e pela integração numérica da curva força em função do deslocamento.

De posse de um sistema de medição instrumentado adequado, para o melhor entendimento das tensões e deformações atuantes durante os processos de fratura por impacto é preciso discretizar em vários estágios com o objetivo de identificar a região elástica e plástica, a fim determinar o limite de escoamento dinâmico, a força de inicio de propagação de trinca e a força máxima entre outros. Somente com a determinação precisa dos esforços críticos atuantes durante o processo de fratura será possível aplicar os resultados obtidos no ensaio instrumentado na determinação da tenacidade à fratura dos materiais.

A curva característica capturada durante o processo de fratura é sempre distorcida em decorrência da influência dos sinais interferentes, ruídos e ondas de choque. Estes sinais interferentes distorcem de tal maneira a curva que para determinar os esforços críticos é necessário tratar a curva com filtragem digital na tentativa de minimizar tais efeitos.

Rodrigues(2006), a pedido de Nogueira(2006), implementou modificações em uma rotina computacional de modo a reduzir os efeitos dos ruídos e oscilações dos sinais oriundos dos corpos-de-prova, das diferentes condições microestruturais e raios de ponta de entalhe, para permitir determinar os esforços envolvidos no processo de fratura com o mínimo de interferência.

Os esforços envolvidos no processo de fratura por impacto foram determinados com base na metodologia de Kobayashi et al. (1993), conhecida como método da flexibilidade *(CCR – Compliance Changing Rate)* e nos procedimentos estabelecidos na norma ASTM E-399/90. Foram estudados os seguintes esforços: Força de Iniciação da Trinca e Força Máxima.

Antes mesmo de se aplicar as metodologias para obter as propriedades na curvas de resposta do ensaio de impacto instrumentado, foi necessário a filtragem para eliminar ruídos e oscilações provenientes do sistema de instrumentação.

Os valores de tenacidade à fratura foram determinados a partir dos seguintes esforços: força de iniciação da trinca e força máxima. Foram empregadas duas técnicas de filtragem digital dos sinais. Uma considerando o método da média móvel, que consiste em determinar a média aritmética simples de um intervalo de pontos previamente selecionados. A curva é reconstruída a partir dos valores médios. Quanto maior o número de filtragens, mais suave a curva vai ficando. Não obstante, existe um limite. Pois, há que se considerar que durante as sucessivas filtragens pode ocorrer perda muito significativa do sinal proveniente exclusivamente do processo de impacto e deste modo deteriorar significativamente a curva característica do processo de fratura. Este é um dos fatores limitadores do método. Saber o momento exato de cessar a filtragem do sinal.

O outro processo de filtragem consistiu na utilização da ferramenta do Matlab, o *Wavelet Toolbox Main Menu*. Esta ferramenta tem a função de filtrar sinais de qualquer origem, pela sua freqüência, utilizando para isso alguns filtros conhecidos como passa-alta e passa-baixa.

Os processos de filtragem não são simples e requeriam tentativas para definir qual é o número possível de filtragem sem comprometer as informações do sinal. Significava que, se o sinal for filtrado várias vezes, causaria uma atenuação nos valores dos esforços envolvidos. A Figura 4.8 mostra um exemplo da filtragem excessiva que compromete as informações do sinal.

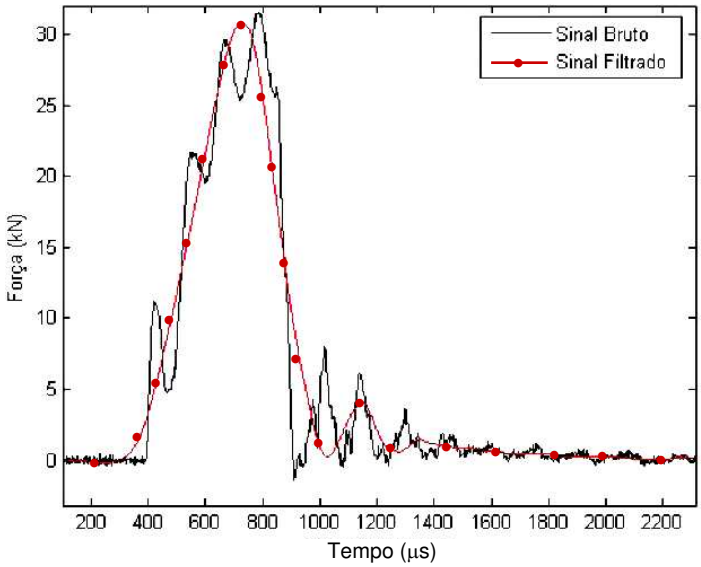


Figura 4.8 – Sinal bruto e sinal filtrado da condição térmica de revenido a 773 K, entalhe arredondado, ensaio de impacto.

Na Figura 4.9, foi plotado o sinal bruto da Figura 4.8, porém filtrado com ambas as metodologias de filtragem e o sinal monotônico correspondente à condição metalúrgica. Nota-se que a filtragem com a *Wavelets*, de uma maneira geral consegue retirar quase todos os ruídos e ondulações do sinal. Porém, um aspecto negativo é que essa técnica invariavelmente modifica a base do sinal, alongando-a e assim modificando as características do sinal tratado. Na Figura 4.9 pode ser visualizada essa modificação no aumento da base do sinal filtrado.

No caso da filtragem com a Média Móvel, dependendo do sinal, pode distorcer em demasia a curva e deste modo comprometer a determinação exata dos parâmetros. Notou-se que em sinais de materiais com fraturas frágeis, que apresenta picos acentuados seguidos de quedas bruscas de força, a técnica da média móvel não podia ser utilizada por várias vezes, pois, causava uma atenuação acentuada no sinal, prejudicando as informações.

Não foi possível determinar um protocolo para aplicar de forma simples e eficaz a técnica de filtragem dos sinais, dependendo do comportamento do material interfere na seleção do procedimento de filtragem. As ferramentas utilizadas possuem uma boa resposta para ensaios onde o tempo de fratura é relativamente grande (maior ductilidade) e conforme esse tempo de fratura diminui, (menor ductilidade) os resultados tendem a deteriorarem, mostrando que a ferramenta precisa de ser aprimorada nesse sentido.

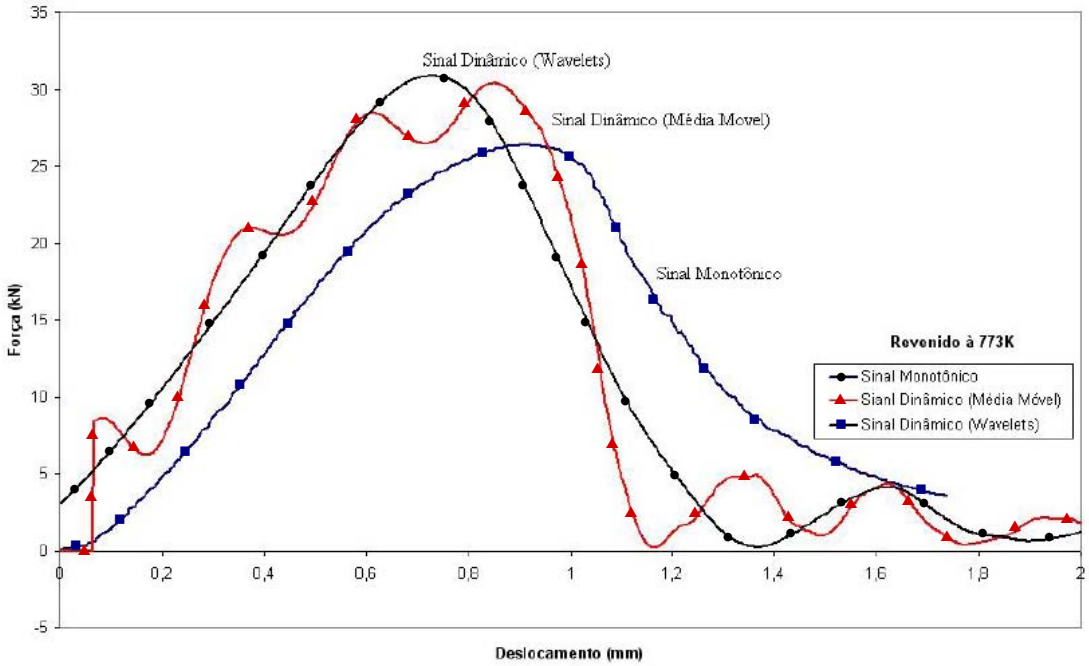


Figura 4.9 – Sinal de força-deslocamento dos corpos-de-prova entalhados do aço ABNT 4340, evidenciando os sinais sem filtragem (Sinal Bruto), com polimento pela média móvel e filtrado pela freqüência (*Wavelets*), Revenido à 773K.

A seguir, são apresentados os valores dos esforços envolvidos no processo de fratura e a uma análise comparativa dos esforços utilizando os pacotes de filtragens desenvolvidos. Utilizou-se os resultados do ensaio monotônico como referência, porém sabe-se muito bem que são ensaios e corpos de prova são completamente distintos. Este valor de referência possibilitou visualizar qual era a faixa de valores que estava determinando.

4.5.3 Força de iniciação de trinca envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhe arredondado e entalhe com pré trinca

Os valores de força de iniciação da trinca, extraídos dos sinais monotônico e dinâmico, foram determinados baseado nos conceitos da metodologia da alteração da flexibilidade, proposta por Kobayashi et al. (1993) e a norma ASTM E399 e incorporados em uma rotina computacional.

No caso dos entalhes pré-trincados, foi utilizado também o conceito da carga P_Q, a fim de determinar a carga P_5 e utilizá-la também como referência na avaliação da força de iniciação de trinca no ensaio dinâmico. A seguir é apresentado esquematicamente o fluxo de cálculos da força de iniciação de trinca.

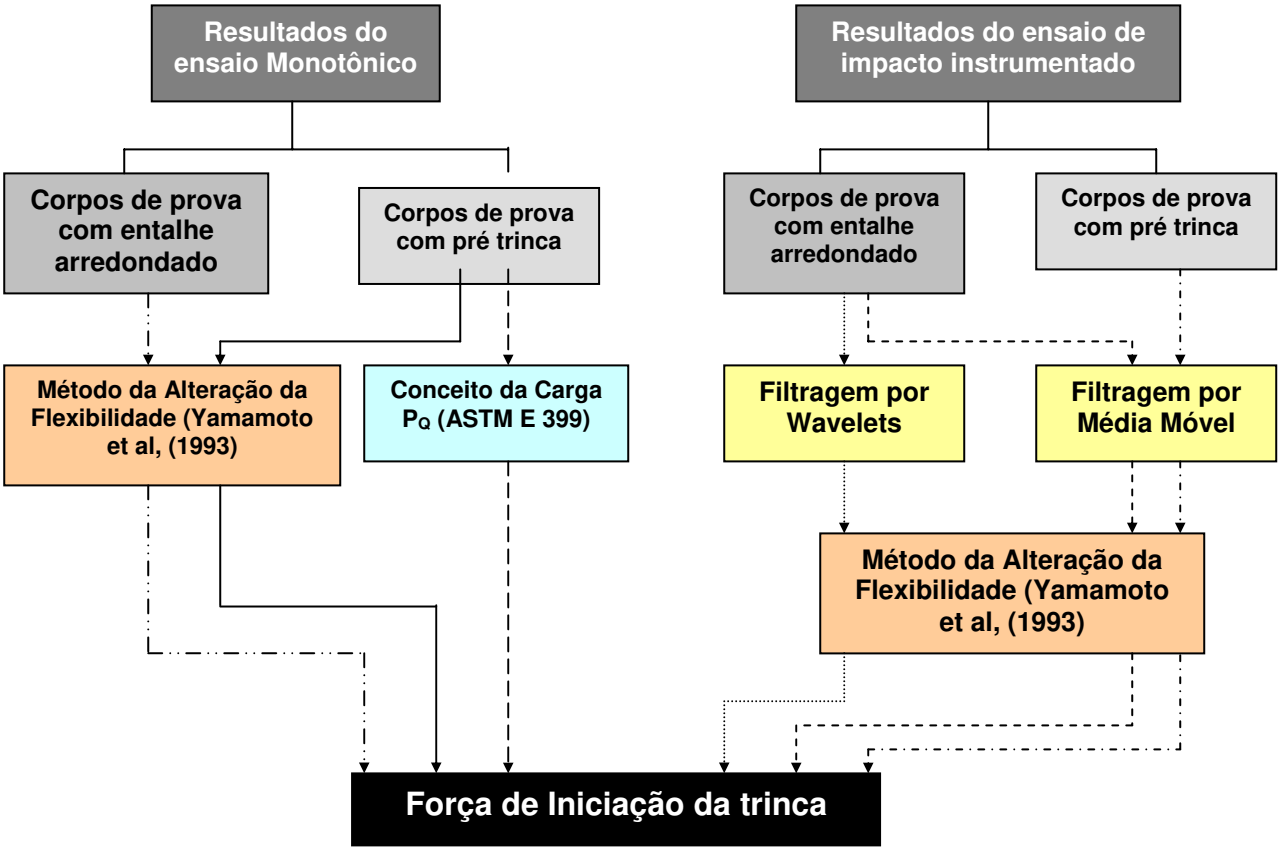


Figura 4.10 - Representação esquemática do fluxo de cálculo da força de iniciação da trinca.

Nas tabelas 4.10 e 4.11 estão apresentados os valores de força de iniciação da trinca e as respectivas diferenças percentuais entre as forças obtidas nas curvas monotônicas e as forças obtidas nas curvas de impacto instrumentado para o entalhe arredondado.

O valor de força de iniciação de trinca obtido no ensaio monotônico foi adotado como a referência na análise de diferenças percentuais. A justificativa de se adotar o resultado do ensaio monotônico permitiu aplicar o método da alteração da flexibilidade em sinais que não possuam ruídos e ondulações, assim a qualidade do sinal não interferiria no resultado do método.

Ao analisar a diferença percentual entre os resultados obtidos no ensaio de impacto instrumentado e os valores de referência, encontra-se uma variação de -38% a 4%. Apesar da variação encontrada, os resultados obtidos com a Média Móvel e *Wavelets* no ensaio Charpy instrumentado estão próximos. Entretanto, não está definido ainda porque os resultados tratados com a Média Móvel e *Wavelets* foram maiores que os resultados do ensaio monotônico.

O fato da proximidade entre os valores obtidos do ensaio Charpy instrumentado através das duas abordagens de filtragem, pode estar relacionado com o comportamento do sinal do ensaio de impacto instrumentado. Ao ensaiar corpos de prova com entalhe arredondado observou-se que no sinal obtido as amplitudes de ruído eram menores que no sinal de corpos de prova com pré trinca, conseqüentemente não havia a necessidade de se filtrar para eliminar os ruídos. Observou-se que dependendo a metodologia de filtragem do sinal, havia perda de informações do sinal real obtido no ensaio.

Tabela 4.10 – Resultados de Força de Iniciação da Trinca (F_{iu}), entalhe arredondado.

Condição de Tratamento Térmico		**Ensaio Monotônico** $[F_{iuMA}]$ **(kN)**	**Ensaio Charpy Instrumentado**	
			Média Móvel $[F_{iuIMMA}]$ **(kN)**	***Wavelets*** $[F_{iuIWA}]$ **(kN)**
Como-temperado		**9,9 (1,3)***	**13,7 (1,1)***	**11,7 (2,6)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**24,8 (6,3)**	**26,3 (0,7)**	**26,0 (4,0)**
	573	**16,6 (2,8)**	**20,2 (0,3)**	**20,1 (4,8)**
	673	**25,4 (0,3)**	**26,9 (0,8)**	**30,6 (3,2)**
	773	**25,0 (0,6)**	**28,6 (0,3)**	**23,8 (1,3)**

*Desvio Padrão

Tabela 4.11 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca do ensaio monotônico e o ensaio dinâmico (F_{iuIMMA} e F_{iuIWA}), entalhe arredondo.

Condição de Tratamento Térmico		**Média Móvel** $\frac{F_{iuMA} - F_{iuIMMA}}{F_{iuMA}} * 100$	**Wavelets** $\frac{F_{iuMA} - F_{iuIWA}}{F_{iuMA}} * 100$
Como temperado		**-38**	**-18**
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**-6**	**-6**
	573	**-21**	**-21**
	673	**-5**	**4**
	773	**-4**	**-20**

Para a análise do comportamento da força de iniciação de trinca em função da temperatura de revenido foi plotado e as curvas apresentadas na Figura 4.11. Nota-se que as três curvas apresentam comportamento semelhante, indicando que o método da alteração da flexibilidade é uma ferramenta para aplicação na avaliação da força de iniciação da trinca. Era de se esperar que as curvas da força de iniciação de trinca em função da temperatura de revenido obtidas pela Média Móvel e *Wavelets* estivessem sobrepostas, porém são duas metodologias distintas de filtragem que podem interferir na qualidade das informações. Um aspecto identificado nas curvas foi a presença de uma selha na temperatura de 573K e logo em seguida um aumento no valor da força de iniciação. Este decremento no valor da força de iniciação de trinca é atribuído ao fenômeno da fragilização da martensita revenida.

Nas tabelas 4.12 e 4.13 estão apresentados os valores de força de iniciação da trinca e as respectivas diferenças percentuais entre as forças obtidas nas curvas monotônicas e as forças obtidas nas curvas dinâmicas para o entalhe com pré trinca.

Neste estudo adotou-se o valor de P_5 como referência na avaliação das diferenças percentuais. Os valores de F_{iuMA} (força de iniciação de trinca no ensaio monotônico) e F_{iuIMMP} (força de iniciação de trinca no ensaio de impacto com filtragem Média Móvel) foram determinados pelo método da alteração da flexibilidade, apesar do conceito tenha sido desenvolvido para aplicação em ensaios dinâmicos.

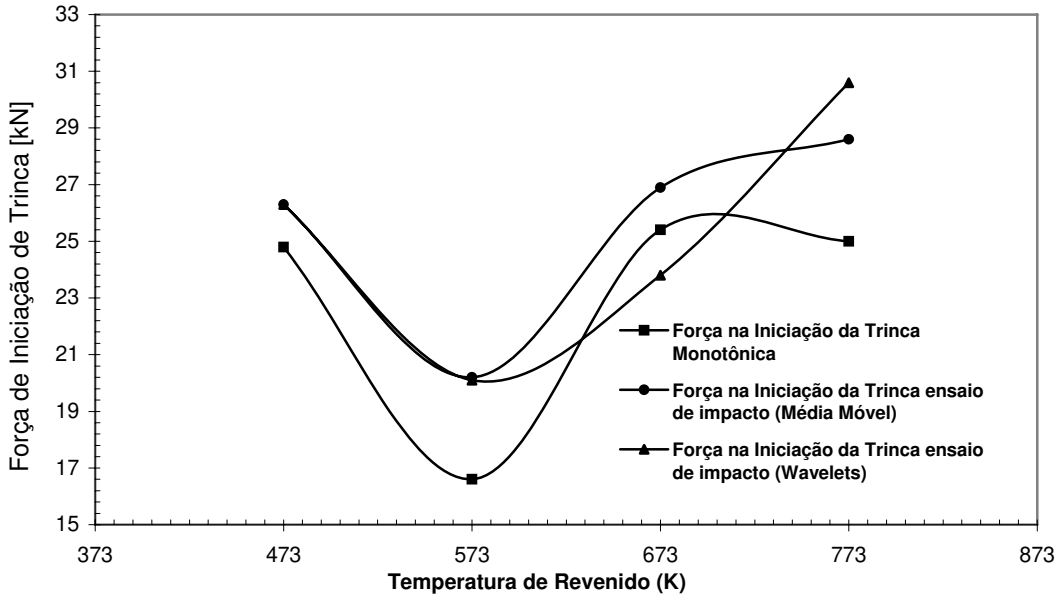


Figura 4.11 - Curvas Força de iniciação da trinca em função da temperatura de revenido em corpos de prova com entalhe arredondado.

Nos resultados de ensaio de impacto em corpos de prova pré trincados utilizou-se apenas a metodologia de filtragem da Média Móvel já que a filtragem por *Wavelets* não foi possível aplicá-la em função da modificação da base do sinal, ou seja, alteração da base de tempo do sinal. Desta forma aplicou-se a filtragem por Média Móvel com cuidados para não atenuar significativamente o sinal.

Notou-se que o método da alteração da flexibilidade nos resultados monotônicos é mais eficaz conforme aumenta a ductilidade, pois a diferença percentual tendeu a diminuir. Na condição térmica de Como-Temperado, a diferença percentual foi de 43% enquanto na condição de revenido a 773K, foi de 1,0%.

As diferenças percentuais dos valores de ensaio de impacto na condição de entalhe pré trincado são maiores que a condição de ensaio monotônico com pré trinca. Ao analisar as diferenças percentuais do ensaio monotônico a vantagem é que o resultado é obtido a partir do mesmo corpo de prova, sendo assim não houve interferência do comprimento da pré trinca.

Tabela 4.12 – Resultados de Força de Iniciação da Trinca (F_{iu}), corpo de prova com pré-trinca.

Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico		Ensaio Charpy Instrumentado
		F_{iuMP} (kN)	P_5 (kN)	Média Móvel [F_{iuIMMP}] (kN)
Como-temperado		2,2 (0,3)*	3,9 (0,7)*	1,6 (0,7)*
Temperatura de Revenido (K)	473	3,0 (0,5)	4,9 (0,5)	3,6 (1,1)
	573	3,7 (0,1)	5,4 (0,5)	2,8 (0,3)
	673	7,1 (0,6)	8,6 (0,3)	4,5 (0,2)
	773	10,0 (0,2)	10,1 (0,5)	9,1 (0,7)

* Desvio Padrão

Tabela 4.13 – Diferença Percentual entre Força de Iniciação da Trinca monotônico (F_{iuMP}), o valor da Carga P_5 e o sinal dinâmico (F_{iuIMMP}), corpo de prova com pré-trincado.

Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico	Ensaio Charpy Instrumentado
		$\frac{P_5 - F_{iuMP}}{P_5} * 100$	Média Móvel $\frac{P_5 - F_{iuIMMP}}{P_5} * 100$
Como temperado		43	59
Temperatura de Revenido (K)	473	38	27
	573	31	48
	673	15	48
	773	1	9

Quanto à influência do raio de ponta na força de iniciação de trinca, há uma queda significativa dos valores de força em todas as condições de tratamento térmico do entalhe arredondado para o entalhe com pré trinca. Isso já era esperado, pois com a inclusão da pré-trinca, há menos material a ser ensaiado, ou seja, menos área resistente.

Na análise do comportamento da força de iniciação de trinca de corpos de prova com pré trinca em função da temperatura de revenido nota-se que a selha não tão pronunciada nos

resultados do ensaio monotônico. Observa-se um patamar entre as temperaturas de revenido de 473K a 573K. No caso dos resultados do impacto instrumentado filtrados pela Média Móvel, a selha se comporta da mesma forma observada nos resultados dos ensaios em corpos de prova arredondados. As curvas força de iniciação de trinca em função da temperatura de revenido de corpos de prova com pré trinca estão apresentadas na Figura 4.12.

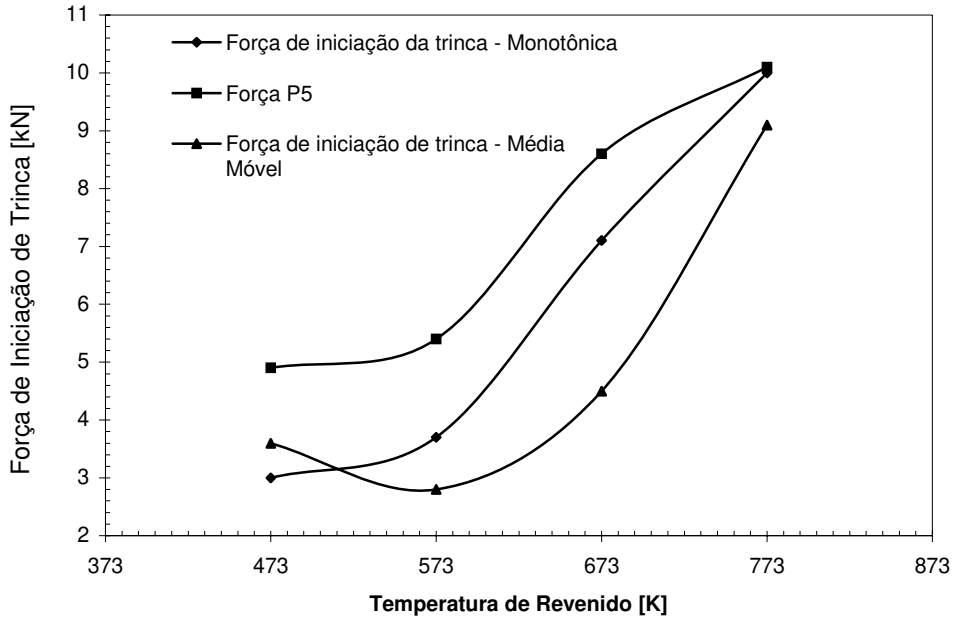


Figura 4.12 - Curvas Força de iniciação da trinca em função da temperatura de revenido em corpos de prova com pré trinca.

4.5.4 Força máxima envolvida nos ensaios dos corpos-de-prova com entalhe arredondado e com pré trinca

Os valores de força máxima foram obtidos antes e após a filtragem do sinal. O procedimento consistiu em encontrar a maior carga no arquivo de cada ensaio, extrair e armazenar esses dados. Os valores de força máxima estão apresentados nas tabelas 4.14 e 4.15.

Na Tabela 4.14, são apresentados os resultados das forças máximas das condições térmicas com entalhe arredondado obtidos nos ensaios de impacto e monotônico. Os resultados do ensaio de impacto estão apresentados de duas maneiras: na primeira, não foi utilizada nenhuma filtragem, extraiu diretamente o valor da carga máxima após o ensaio. Na segunda foi utilizadas as duas filtragens, Média Móvel e *Wavelets*, para polimento da curva e melhor interpretação da carga máxima.

Tabela 4.14 – Resultados de Força Máxima (F_m), entalhe arredondado.

Condição de Tratamento Térmico		Ensaio Monotônico [F_{mMA}] (kN)	Ensaio Charpy Instrumentado		
			Sem filtragem [F_{mIsFA}] (kN)	Média Móvel [F_{mIMMA}] (kN)	*Wavelets* [F_{mIWA}] (kN)
Como-temperado		14,0 (0,9)*	18,2 (4,0)*	17,8 (1,5)*	17,7 (3,5)*
Temperatura de Revenido (K)	473	31,5 (0,8)	32,0 (1,0)	30,8 (1,3)	29,2 (1,4)
	573	28,5 (1,0)	25,5 (0,5)	23,3 (3,8)	24,1 (1,4)
	673	27,6 (0,3)	31,5 (0,5)	29,8 (0,3)	30,3 (2,2)
	773	26,3 (0,8)	30,5 (1,0)	28,7(0,3)	29,6 (1,2)

*Desvio Padrão

O valor de força máxima extraída após o ensaio de impacto, isto é, sem filtragem da curva, foi um parâmetro de análise dos procedimentos de filtragens. Nota-se que os resultados de força máxima obtidos após a filtragem com a média móvel são os menores valores no ensaio Charpy instrumentado sem filtragem. Já a filtragem *Wavelets,* os resultados se aproximam dos valores da força máxima obtidos sem a filtragem das curvas. Na Figura 4.13 são apresentadas duas curvas força em função do deslocamento de duas condições metalúrgicas, como temperado e revenido a 673K, ensaiadas com entalhe arredondado. Nota-se que o efeito da diminuição da força máxima nas curvas filtradas com a Média Móvel é maior em corpos de prova de maior fragilidade.

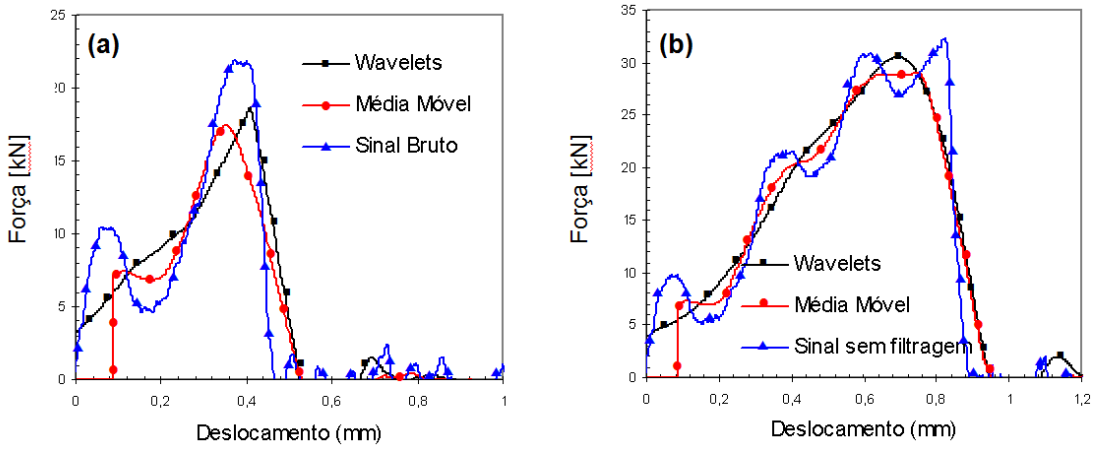


Figura 4.13 – Curvas força em função do deslocamento de duas condições metalúrgicas ensaiadas com entalhe arredondado. a) Como temperado; b) Revenido a 673K.

Analisando o comportamento da força máxima em função da temperatura de revenido de corpos de prova com entalhe arredondado, nota-se que a selha na temperatura de 573K é bem pronunciada nos resultados do ensaio de impacto instrumentado. No resultado do ensaio monotônico, não se observa a selha, a força máxima diminui em função da temperatura de revenido. Na Figura 4.14 são apresentadas as curvas de força máxima em função da temperatura de revenido.

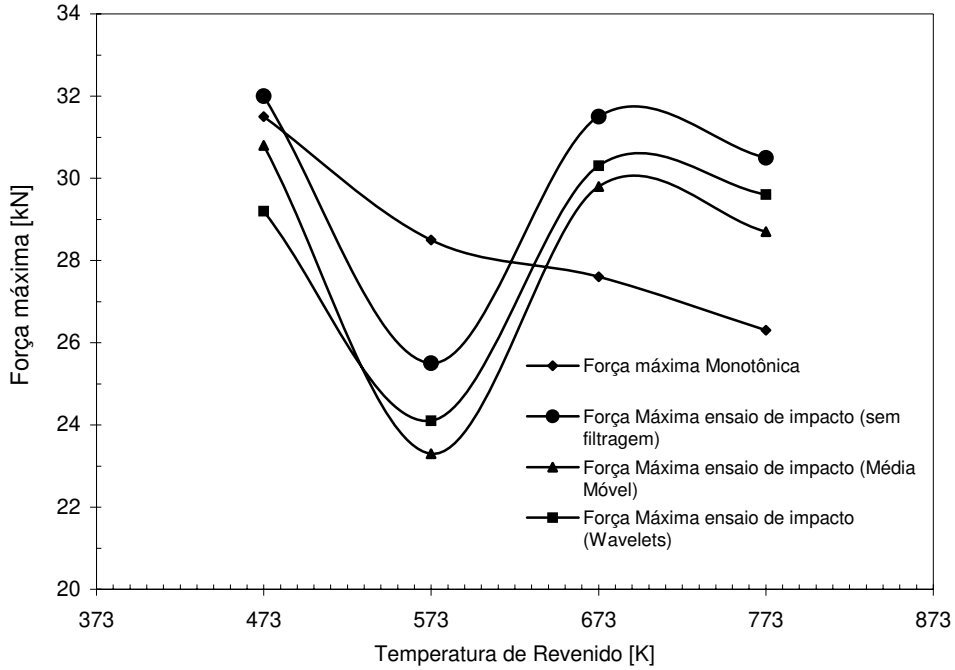


Figura 4.14 - Curvas Força máxima em função da temperatura de revenido em corpos de prova com entalhe arredondado.

Na Tabela 4.15, são apresentados os resultados da força máxima para os corpos de prova com pré trinca no entalhe. Diante do mesmo problema enfrentado na determinação da força de iniciação de trinca, não foi possível aplicar a filtragem por *Wavelets*, pois a informação do sinal era perdida após a filtragem, desta forma optou-se filtrar o sinal apenas com a Média Móvel.

Na análise do comportamento da força máxima de corpos de prova com pré trinca em função da temperatura de revenido nota-se que a selha não tão pronunciada nos resultados do ensaio monotônico. Observa-se um patamar entre as temperaturas de revenido de 473K a 573K. No caso dos resultados do impacto instrumentado filtrados pela Média Móvel e sem a filtragem, a selha se comporta da mesma forma observada nos resultados de força máxima dos ensaios em

corpos de prova arredondados. As curvas força máxima em função da temperatura de revenido de corpos de prova com pré trinca estão apresentadas na Figura 4.15.

Tabela 4.15 – Resultados de Força Máxima (F_m), corpo de prova com pré-trincado.

Condição de Tratamento Térmico		**Ensaio Monotônico [F_{mMP}] (kN)**	**Ensaio Charpy Instrumentado**	
			Sem filtragem [F_{mIsFP}] (kN)	**Média Móvel [F_{mIMMP}] (kN)**
Como-temperado		**4,2 (0,2)***	**10,0 (1,0)***	**7,3 (0,4)***
Temperatura de Revenido (K)	**473**	**5,0 (0,4)**	**9,0 (1,0)**	**6,5 (0,9)**
	573	**5,2 (0,5)**	**7,0 (0,3)**	**5,5 (0,5)**
	673	**8,8 (0,2)**	**9,3 (0,8)**	**6,7 (0,2)**
	773	**10,7 (0,6)**	**12,7 (0,5)**	**11,4 (0,8)**

*Desvio Padrão

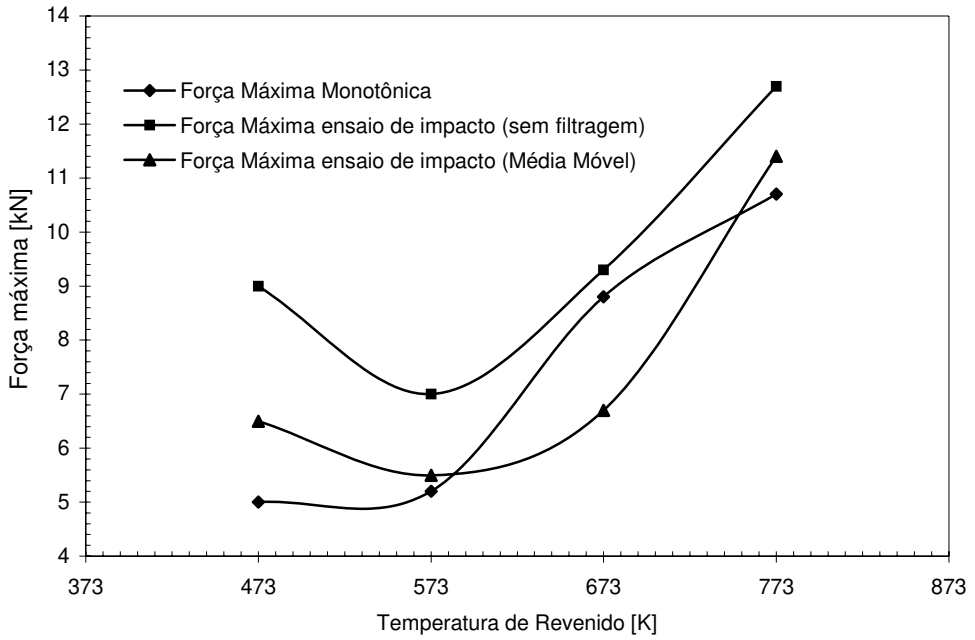


Figura 4.15 - Curvas Força máxima em função da temperatura de revenido em corpos de prova com pré trinca.

4.5.5 Fator de intensidade de tensão monotônico e dinâmico

No presente trabalho foi desenvolvida uma rotina computacional com as aproximações numéricas de Kalthoff para determinar a curva de resposta ao impacto. Para cada condição de ensaio, a/W, (*a* – comprimento de trinca e *W* – largura do corpo de prova) foi gerado a curva de resposta ao impacto correspondente.

Na Figura 4.16 é apresentado um exemplo da curva de resposta ao impacto característica da condição de ensaio do presente trabalho. A condição neste caso representada na Figura 4.16 refere-se a um comprimento de trinca, *a*, igual a 4,65mm, largura de corpo de prova, *W*, igual a 10,0mm e velocidade de impacto, V_0, igual a 5,50m/s.

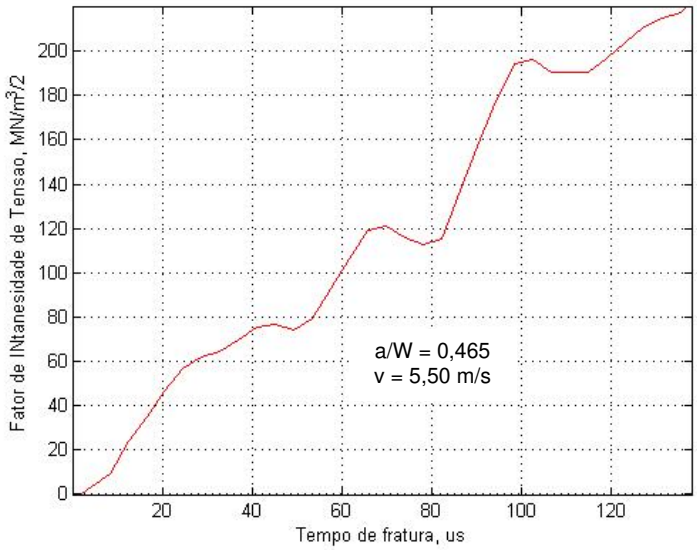


Figura 4.16 – Curva de reposta ao impacto para a/W = 0,465 e V_0 = 5,50m/s.

A metodologia adotada na avaliação do tempo de fratura compreendeu em determinar o valor de força, assim retornar na curva força em função do tempo obtido no ensaio de impacto instrumentado e determinar o tempo. Neste trabalho, foi determinado o tempo envolvido tanto para a força de iniciação de trinca como para a força máxima a partir das curvas de impacto instrumentado filtradas com a metodologia da Média Móvel de corpos de prova com pré trinca por fadiga. Diante dos resultados da curva de resposta ao impacto, conforme a mostrado na

Figura 4.16, para cada corpo de prova e os tempos de fratura envolvidos na força de iniciação e força máxima, determinava o fator de intensidade de tensão dinâmico. Nas tabelas 4.12 e 4.15 do Capítulo 4, estão apresentados os valores de força de iniciação de trinca e força máxima determinados a partir dos resultados do ensaio Chapry instrumentado.

Na Tabela 4.16 são apresentados os resultados dos fatores de intensidade de tensão monotônico e dinâmico determinado a partir dos valores de força máxima e força de iniciação da trinca do ensaio de impacto Charpy instrumentado em corpos de prova pré trincados em aço ABNT/SAE 4340 em condições microestruturais distintas. O valor de K_{Id} está apresentado conforme a metodologia empregada: de Kalthoff, ASTM E 399, as aproximações de Barsom (1975) e de Sailors-Corten (1972).

Nota-se que os resultados de tenacidade à fratura dinâmica obtidos a partir de correlações matemáticas com a energia global são menores que os demais e não representam valores adequados para aplicação da análise de integridade de equipamentos sob condições de esforços dinâmicos. Os autores quando propuseram as correlações estabeleceram que o equacionamento deveria ser utilizado na região de transição do comportamento frágil-dúctil da curva energia global em função da temperatura. Os ensaios de impacto instrumentado deste trabalho foram realizados em temperatura ambiente, impossibilitando assim determinar a região de transição. Porém, analisando os resultados de tenacidade à fratura dinâmica obtidos pela correlação de Barsom e Kalthoff na força de iniciação de trinca para as condições de revenido 673K e 773K, nota-se que os valores estão próximos, o que talvez pode ser um indicativo que as duas condições microestruturais estejam na região de transição ou acima.

Os valores de tenacidade à fratura dinâmica estimados a partir da norma ASTM E399 são próximos dos resultados da tenacidade a fratura monotônica. No equacionamento da norma não prevê a influência da taxa de deformação, o que torna a análise da propriedade dinâmica inconsistente, pois é conhecido que a quanto maior a taxa de deformação maior é a tendência do material apresentar comportamento frágil (Herzberg, 1995). A adequação da norma para determinar a propriedade dinâmica consistirá em implementar a taxa de intensidade de tensão do ensaio dinâmico, $\dot{K}_{Id}$, no equacionamento. Cabe ressaltar que o ensaio monotônico é realizado com a taxa de fator de intensidade de tensão entre 0,5 e 3,0 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}/\mathrm{s}$, muito diferente de um ensaio de impacto Charpy pode alcançar até $10^5\ \mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}/\mathrm{s}$.

Desta forma, os resultados de K_{Id} obtidos a partir do ensaio de impacto instrumentado não são satisfatórios para aplicações de engenharia. Um estudo mais aprofundado na quantificação do fator de intensidade de tensão dinâmico considerando as taxas de intensidade de tensão envolvidas no processo de fratura por impacto muito provavelmente, leve a resultados próximos aos de Kalthoff.

Os resultados obtidos pela metodologia de Kalthoff são promissores, apesar de não utilizar a mesma metodologia para determinar o tempo de fratura. Cabe ressaltar, que Kalthoff utiliza sensores resistivos e magnéticos nos corpos de prova para medir o tempo de fratura e neste trabalho, primeiramente foi determinado a força de iniciação ou máxima e em seguida feito a leitura do tempo correspondente para a carga em questão na curva força em função do tempo do ensaio de impacto instrumentado.

A técnica de Kalthoff para medição da tenacidade à fratura dinâmica com o auxílio das curvas de resposta ao impacto e o tempo de fratura representa uma avaliação dinâmica completa, onde os efeitos inerciais são considerados durante toda a ocorrência do impacto. O tempo de fratura foi a propriedade variável conforme a condição microestrutural do corpo de prova. Neste caso, é conveniente imaginar que assim como existe uma tensão crítica e um comprimento crítico de trinca, também exista um tempo crítico para fratura. E, sendo assim, o "tempo crítico de fratura" também pode ser postulado como sendo uma propriedade de um determinado estado de um material.

Yokoyama (1993) apresentou uma técnica para determinar o fator de intensidade de tensão dinâmico. O pesquisador utilizou ligas de alumínio, de titânio e o aço 4340 temperado e revenido à 270^{o}C e às submeteu a ensaios monotônicos da ordem de $\dot{K} = 0{,}6\ \mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}/\mathrm{s}$ e ensaios dinâmicos da ordem de $\dot{K} = 10^{6}\ \mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}/\mathrm{s}$, determinou o K_{IC} de cada material e comparou com o K_{Id}. No caso do aço 4340, o valor de K_{IC} encontrado foi de $43{,}6\,MPa\sqrt{m}$ e de K_{Id} foi de 60,8 $MPa\sqrt{m}$. Os valores de K_{Id} foram determinados a partir do tempo de iniciação de trinca e a curva de resposta ao impacto obtida a partir da técnica de elementos finitos. O tempo de iniciação da trinca foi medido através de extensômetros elétricos próximos a pré trinca.

O pesquisador concluiu que a tenacidade à fratura dinâmica na iniciação da trinca do aço 4340 é aproximadamente 40% maior que a tenacidade à fratura monotônica, e notou também que o tempo de iniciação da trinca não necessariamente coincidia com o valor máximo na curva de

força em função do deslocamento do ensaio de impacto instrumentado. Esta observação também está bem definida neste trabalho. Os valores de força de iniciação de trinca são menores que os valores de força máxima, conseqüentemente resultam na diferença entre os tempos envolvidos para ocorrer a iniciação da trinca e a máxima carga.

Chi et al. (1989) estudou o efeito da temperatura de revenimento e a temperatura de teste na tenacidade à fratura dinâmica e quasi-estática, denominada pelo autor, do aço SAE 4340 VAR (*vaccum arc-remelted*). O material foi submetido a austenitização à 875^{o}C por uma hora seguido de revenimento à 200^{o}C, 350^{o}C e 425^{o}C. Os ensaios foram realizados nas temperaturas ambiente, -140^{o}C, -100^{o}C, -50^{o}C e 100^{o}C, a uma taxa de $\dot{K}$= 2x10^{6} MPa$\sqrt{\text{m}}$/s, para o ensaio dinâmico e $\dot{K}$= 1,0 MPa$\sqrt{\text{m}}$/s, para o ensaio monotônico. A palavra quase-estático e monotônico são sinônimos neste trabalho. O pesquisador utilizou explosivos em corpos de prova pré trincados de seção circular. A avaliação do fator de tensão dinâmico foi obtido a partir da leitura do tempo de fratura e aplicado nas equações matemáticas desenvolvidas pelo autor. O tempo de fratura foi obtido a partir de extensômetro elétrico posicionado próximo a pré trinca. Os resultados de Chi et al. estão apresentados na Tabela 4.16.

Os valores de K_{Id} calculados pelo método de Kalthoff a partir do resultados de força máxima tendem aumentar conforme o aumento da temperatura de revenimento. Na temperatura de revenimento de 200 ^{o}C, o valor encontrado por Chi et al. é de 69 $MPa\sqrt{m}$ e encontrado neste trabalho é de 51,6 $MPa\sqrt{m}$. Esta diferença pode estar atribuída à taxa de deformação envolvida em cada trabalho. Chi et al. utiliza uma taxa de 2x10^{6} MPa$\sqrt{\text{m}}$/s enquanto a taxa utilizada neste trabalho é de 10^{5} MPa$\sqrt{\text{m}}$/s.

Nota-se que os valores de K_{Id} calculados pelo método de Kalthoff a partir do resultados de força de iniciação de trinca são significativamente menores que os resultados da literatura. Ambos os pesquisadores utilizaram o tempo de iniciação de trinca para avaliar K_{Id}. Portanto, os valores esperados neste trabalho deveriam estar próximos da literatura, salvo o fato da taxa de deformação envolvida em cada ensaio. Essa discrepância decorre de dois aspectos na caracterização da força de iniciação de trinca: primeiro, a escolha correta do método de filtragem do sinal e a segunda, a faixa de aplicação adequada do método de Kobayashi.

Conforme descrito anteriormente, na determinação da força máxima não utilizou nenhum método de filtragem, o resultado era extraído diretamente do vetor força-tempo. Isso pode ser um dos motivos que os resultados K_{Id} calculados pelo método de Kalthoff a partir do resultados de força máxima se apresentarem em sincronia com a literatura, um outro motivo, pode-se imaginar também que o início da trinca está muito próximo do valor de força máxima. No caso da caracterização da força de iniciação, foi utilizado o método de filtragem pela média móvel. A eliminação de todos os sinais de interferência, ruídos e ondas de choque, provocava uma atenuação significativa no sinal característico do ensaio de impacto instrumentado e conseqüentemente comprometia os resultados da aplicação do método de Kobayashi.

O método de Kobayashi, como o próprio nome sugere, *Compliance Change Rate*, define na curva característica do ensaio de impacto instrumentado as regiões do processo de fratura a partir da alteração da flexibilidade (*Compliance*) do corpo de prova ensaiado. Estas regiões são de deformação elástica, de deformação plástica, de deformação localizada e propagação da trinca, e são bem pronunciadas e discretas quanto maior for a tenacidade da condição do material ensaiada. Nos resultados de K_{Id} calculados pelo método de Kalthoff a partir do resultados de força de iniciação de trinca observa-se um incremento nos resultados com o aumento da temperatura de revenimento. Na condição de revenido a 773K, o valor de K_{Id} é de $55{,}7\,MPa\sqrt{m}$ enquanto que em 473Ké de $15{,}4\,MPa\sqrt{m}$.

Ao analisar o comportamento de cada condição a partir da curva do ensaio Charpy instrumentado, apresentadas nos Anexo 2, Figura A.7 e Figura A.10, nota-se que diferença do deslocamento calculado é da ordem de três vezes. Na condição de 473K, o deslocamento máximo foi de aproximadamente 0,5mm e enquanto na condição de 773K, foi de 1,5mm. Quanto ao micromecanismo de fratura, na condição de 473K, foi identificado uma fratura mista (intergranular e alveolar), já na condição de 773K, prevaleceu o micromecanismo alveolar, indicando fortemente a maior tenacidade da condição de maior temperatura de revenimento.

Tabela 4.16 – Valores de Fator de intensidade de tensão dinâmico, K_{Id}, calculados a partir dos resultados de força máxima do ensaio de impacto instrumentado de corpos de prova com pré trinca.

Condição Microestrutural (ABNT 4340)		**K_Q – Fator de intensidade de tensão monotônico** $\left[MPa\sqrt{m}\right]$		**K_{Id} – Fator de intensidade de tensão dinâmico** $\left[MPa\sqrt{m}\right]$						
		Ensaio Monotônico K_Q	Chi et al. (1989)	Sailors-Corten (1972) $K_{Id}^{\,2} = 15{,}873\sqrt[8]{E_D^{\,3}}$	Barsom (1975) $\frac{K_{Id}^{\,2}}{E} = 5E_D$	Força máxima [F_m]		Força de iniciação da trinca [F_{iu}]		Chi et al. (1989)
						ASTM E399	Kalthoff	ASTM E399	Kalthoff	
como-temperado		33,7(1)	----------	5,1 (0,3)*	19,2 (3,1)	84,3 (11,7)	34,7 (13,7)	16,5 (2,0)	4,2 (1,2)	----------
Revenido	473K	47,4(1)	46,0(1)	5,9 (0,3)	28,6 (4,2)	86,9 (23,6)	51,6 (10,4)	38,0 (13,1)	15,4 (4,1)	69,0
	573K	53,5(1)	59,0(1) (2)	5,6 (0,1)	25,4 (1,3)	73,8 (12,5)	68,9 (11,5)	30,2 (3,3)	16,5 (2,1)	89,0(2)
	673K	83,1	98,0(3)	6,2 (0,1)	32,4 (0,7)	83,2 (6,2)	96,5 (16,5)	47,2 (0,6)	34,2 (8,3)	138,0(3)
	773K	100	----------	7,0 (0,1)	46,1 (1,6)	101,6 (7,7)	117,2 (4,7)	83,9 (14,5)	55,7 (4,7)	----------

E_D = Energia absorvida Ensaio Charpy Clássico (Dial da Máquina)
E = Módulo de Elasticidade, valor adotado (ASM Handbook, vol. 8), E = 196,4GPa
* Desvio Padrão
(1) $K_Q = K_{IC}$
(2) Temperatura de revenido 350°C;
(3) Temperatura de revenido 425°C;
-------- não avaliado pelo pesquisador.

4.5.6 Curvas força-deslocamento do ensaio de impacto instrumentado e as fractografias

O principal resultado do ensaio de impacto instrumentado é a curva força em função do deslocamento do corpo de prova durante o impacto. Estas curvas caracterizam o processo de fratura por impacto e permitem obter informações para aplicação na Mecânica de fratura. Na Figura 1.5 do Capítulo 1 são apresentadas curvas características de comportamento frágil e dúctil do ensaio de impacto instrumentado. A norma ISO 14.556(2000) classifica as curvas conforme o comportamento obtido. A Figura 4.17 mostra as curvas características que a normatização exemplifica.

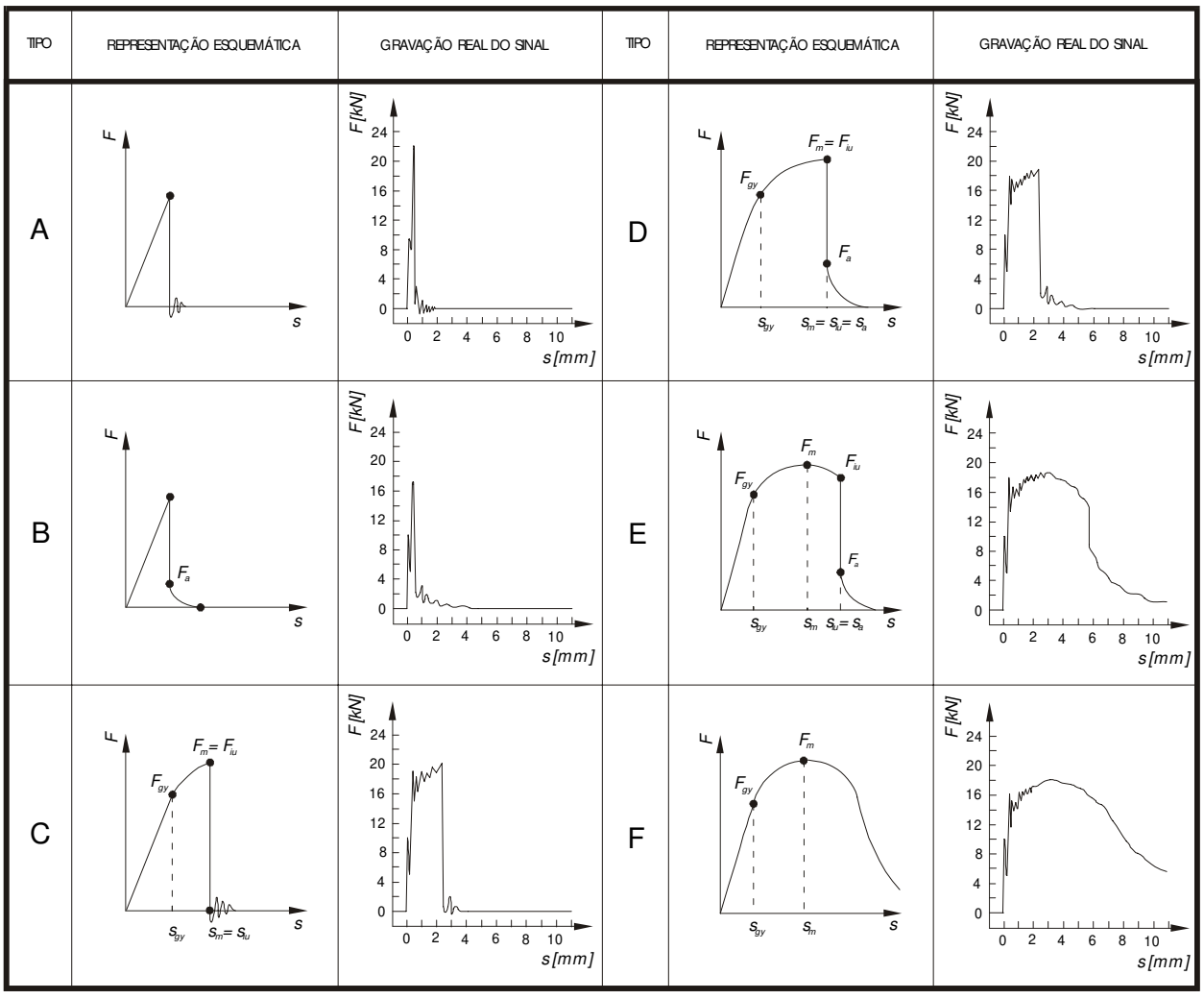


Figura 4.17 – Curvas características força-deslocamento classificadas pela norma ISO.

Os diversos formatos de sinais se enquadram como tipo A ao F. Os tipos A e B indicam que a energia do material ensaiado encontra-se no patamar inferior da curva de transição dúctil-frágil do ensaio Charpy clássico, caracterizando um comportamento frágil. As curvas do tipo C, D e E indicam que a energia encontra-se na região de transição. Por último, na curva do tipo F, a energia localiza-se no patamar superior, caracterizando um comportamento dúctil.

Nos ensaios realizados, nota-se comportamentos frágeis e ligeiramente dúcteis, como pode ser visto na Figura 4.18, as curvas da condição microestrutural como temperado e na condição de 773K para corpos de prova com entalhe arredondado. Estas curvas podem ser classificadas, conforme a ISO, nos tipos A e C.

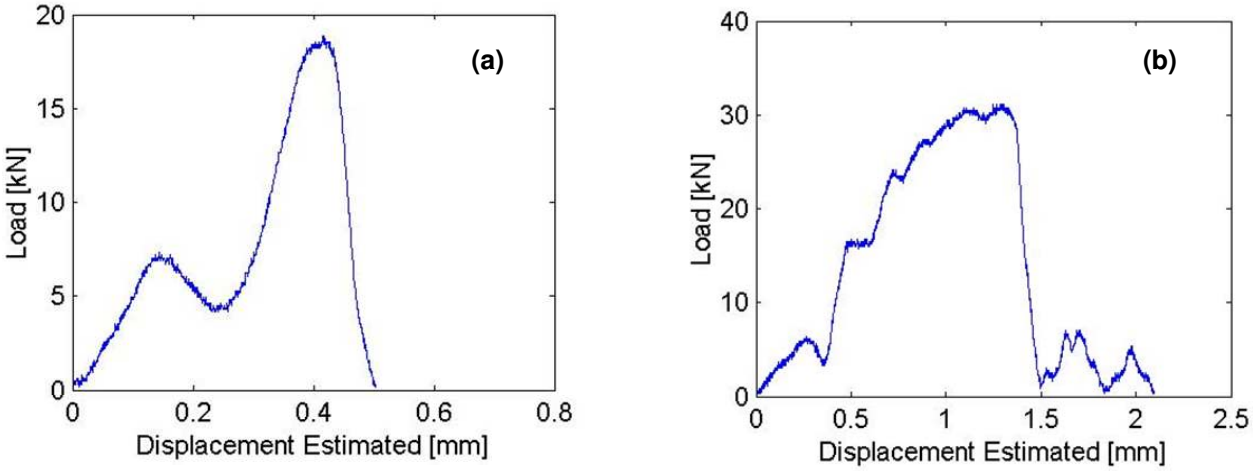
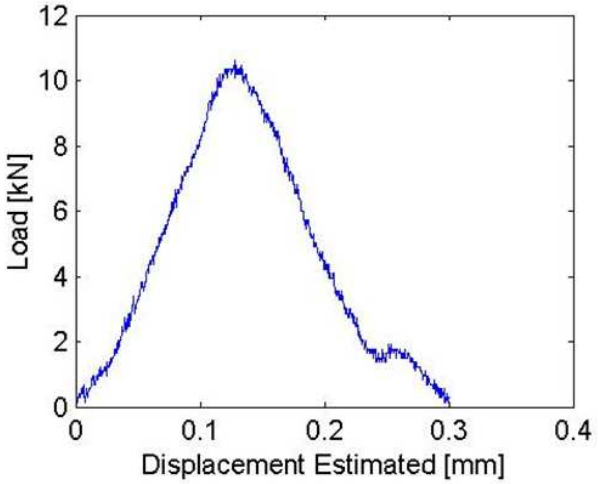


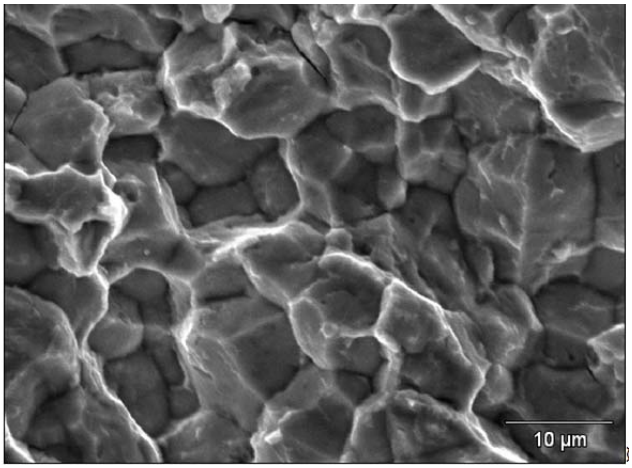
Figura 4.18 - Curvas de reposta do ensaio de impacto instrumentado realizado na condição do corpo-de-prova com entalhe arredondado na condição microestrutural: (a) como temperado e (b) revenido 773K e entalhe arredondado.

As curvas do ensaio de impacto instrumentado dos corpos de prova com entalhe arredondado foram bem definidas e sempre obedecendo a um comportamento característico apresentado na Figura 4.17. Isto não ocorreu nas curvas do ensaio de impacto instrumentado dos corpos de prova com pré trinca. O comportamento das curvas foi semelhante nas condições de como temperado, revenido à 473K, 573K e 673K e, normalmente apresentava um ou dois picos acentuados seguidos de decaimento suave exceto a condição de revenido a 773K. Por outro, os micromecanismos de fratura se alteravam de condição para condição.

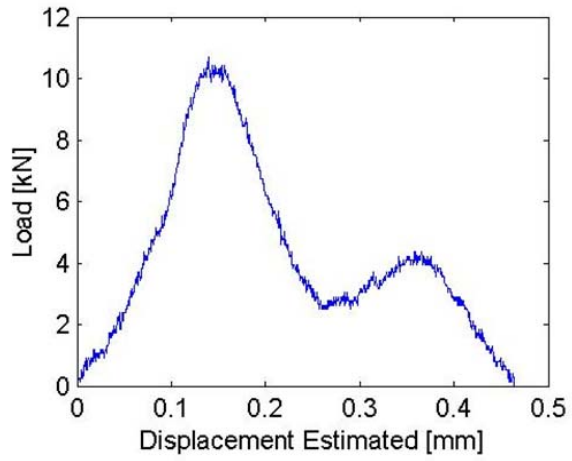
Este decaimento suave pode estar relacionado à sensibilidade do martelo instrumentado. Vidotto (2001) avaliou a calibração estática e dinâmica de dois martelos pendulares e concluiu

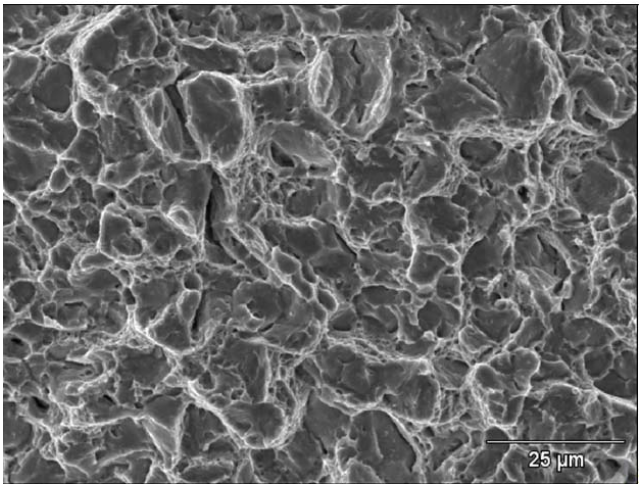
que a rigidez do martelo deve ser inversamente proporcional a tenacidade do material ensaiado, ou seja, um material menos tenaz não deve ser ensaiado com o mesmo martelo de um material de maior tenacidade. Neste trabalho, o martelo utilizado seguia a configuração original do martelo da máquina convencional e instrumentado conforme os requisitos da ISO 14.556. A Figura 4.19 apresenta duas curvas de impacto instrumentado para corpos de prova com pré trinca e o respectivo micromecanismo de fratura.





a) Curvas de reposta do ensaio de impacto realizado na condição do corpo de prova temperado e entalhe com pré trinca. Micromecanismo predominante: Intergranular.





b) Curvas de reposta do ensaio de impacto realizado na condição do corpo-de-prova revenido a 473K e entalhe com pré trinca. Micromecanismo: Intergranular com regiões de microcavidades.

Figura 4.19 – Curvas do ensaio de impacto instrumentado em corpos de prova com pré trinca e os respectivos micromecanismos de fratura.

Com o objetivo de identificar o micromecanismo de fratura e o comportamento da curva de impacto instrumentado de cada condição ensaiada organizou-se de forma sucinta no Anexo 2. A resposta ao ensaio de impacto instrumentado foi apresentada em quatro curvas distintas. A primeira curva, força em função do tempo, representa o sinal obtido diretamente do martelo instrumentado corrigido pelo fator de calibração e tempo para o processo de fratura por impacto. A segunda curva, força em função do deslocamento estimado, é a curva fundamental do ensaio de impacto instrumentado. É o sinal obtido do martelo corrigido pelo fator de calibração e o deslocamento estimado pelas equações 1.8 e 1.9 do Capítulo 1.

A terceira curva, força e energia absorvida em função do tempo, é a primeira curva e o a energia absorvida durante o processo de fratura. O valor de energia foi calculado a partir da integração numérica da curva força em função do deslocamento estimado. Por ultimo a quarta curva, força e energia absorvida em função do deslocamento estimado, é a curva fundamental do ensaio de impacto instrumentado e a energia absorvida calculada por integração da curva fundamental.

Para cada condição, é apresentada a superfície geral de fratura do corpo de prova e os micromecanismos de fratura predominantes. Os micromecanismos foram registrados próximos ao entalhe/pré trinca de cada corpo de prova.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Os resultados obtidos deste trabalho permitem abstrair as seguintes conclusões:

Com respeito à determinação da tenacidade à fratura dinâmica do aço 4340 nas condições metalúrgicas analisadas (como temperado, revenido a 473K, 573K, 673K e 773K):

Neste trabalho utilizou duas metodologias na determinação dos esforços durante o processo de fratura por impacto e na tenacidade à fratura dinâmica. Os esforços foram determinados a partir da metodologia de Kobayashi et al. (1993) e a tenacidade à fratura dinâmica determinada a partir do conceito da curva de resposta ao impacto definida por Kalthoff et al. (1985). Para se avaliar o grau de significância dos valores de tenacidade à fratura dinâmica determinada conforme descrtio, tomou-se como referência os valores de tenacidade à fratura determinados em ensaio monotônico e os valores da literatura. As principais conclusões são as seguintes:

- Os valores de tenacidade à fratura estimados a partir do valor da energia global de fratura como originalmente proposto por Sailors-Corten e Barsom conduz a resultados muito discrepantes quando comparado com os valores de referencia obtidos a partir da literatura. Todavia, as expressões modificadas Barsom conduzem a valores mais próximos de tenacidade à fratura monotônica. Este fato serve para ilustrar que é possível obter expressões matemáticas úteis que correlacionam tenacidade à fratura com a energia global de fratura. Todavia, a faixa em que se observa correlação satisfatória é normalmente muito estreita e não comporta generalizações;

- Os valores de tenacidade à fratura dinâmica estimados pelo conceito de Kalthoff, sobretudo para os tempos relacionados com a força máxima se aproximam bem dos valores da literatura, o que não se observa para os valores de força de iniciação de trinca. Nesta análise, pode-se interpretar que os tempos envolvidos na iniciação da fratura pode estar bem próximos dos tempos para ocorrer a força máxima, e a ferramenta da Taxa de Alteração da Flexibilidade (Kobayashi et al., 1993) não foi adequada para a utilização em condições de baixa tenacidade.

- Aparentemente ocorre uma maior aproximação dos valores nas condições microestruturais em que tempo de fratura é maior. Nestes termos, pode-se postular que assim como existe uma tensão crítica e um comprimento crítico de trinca, também deve existir um tempo crítico para fratura. E, sendo assim, o "tempo crítico de fratura" também pode ser postulado como sendo uma propriedade de um dado estado de um material. Todavia, para que se utilize o tempo crítico de fratura como uma propriedade do material que mantém uma estrita relação com a tenacidade à fratura é preciso determinar tal parâmetro com grande precisão;

Com respeito à instrumentação:

O sistema de medida instrumentado impacto desenvolvido neste trabalho e aplicada em uma máquina convencional permitiu determinar esforços envolvidos no processo de fratura por impacto. A grande proximidade dos valores da energia global lida no relógio indicador da

máquina de impacto com os determinados por integração numérica, a partir das curvas capturadas durante a ruptura por impacto, é um bom indicativo de que o sistema de medida empregado na instrumentação da máquina Charpy permite monitorar satisfatoriamente o processo de fratura.

Com respeito à determinação dos esforços críticos de fratura:

As curvas características do processo de impacto são distorcidas sobretudo pela atuação de dois sinais interferentes: ruído e ondas de choque. O ruído, que exerce efeito menos grave, pode ser razoavelmente eliminado com o aprimoramento do aterramento. Todavia as ondas de choque são difíceis de serem eliminadas. Tais ondas dificultam a identificação dos esforços críticos relacionados com o processo de fratura, como a força de iniciação de trinca e, conseqüentemente, compromete a determinação da tenacidade a fratura dinâmica. Assim, é necessário recorrer à filtragem digital do sinal. No presente trabalho recorreu-se a duas técnicas de filtragem digital, média móvel e *Wavelets*, nenhuma das duas apresentou resultados completamente satisfatórios. Este é o principal fator a ser superado para que efetivamente se consiga obter propriedades mecânicas mais nobres, como a tenacidade à fratura, a partir da instrumentação do ensaio Charpy.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões a seguir poderão incorporar resultados mais acurados na determinação da tenacidade à fratura a partir do ensaio de impacto instrumentado.

- Estudar a tenacidade à fratura em máquinas de ensaio de impacto de menor capacidade;
- Medir o tempo para início da fratura através da técnica de extensometria e o amplificador de sinais desenvolvido pelo Laboratório de Qualidade de Energia/UNESP que foi utilizado neste trabalho;
- Utilizar a técnica de emissão acústica para a medida do tempo de início de fratura;
- Elaborar um estudo por análise de elementos finitos em configurações de geometrias distintas de martelos pendulares com o objetivo de melhorar a sensibilidade e atenuar os efeitos de ondulações nos sinais;

- Aplicação do fator de intensidade de tensões determinado no ensaio de impacto instrumentado em componentes ou estruturas metálicas que possam ser submetidas a ensaios laboratoriais.

Referências Bibliográficas

AGGAG, G., TAKAHASHI, K. Study of oscilation signals in instrumented Charpy impact test. **Polymer Engineering and Science**, v. 36, n.17, p. 2260-2266, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E08M**: Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. In: ASTM Volume 03.01, Metals - Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography: 2008. 25p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E18**: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. In: ASTM Volume 03.01, Metals - Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography: 2008. 37p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23**: Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials. In: ASTM Volume 03.01, Metals - Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography: 2007. 28p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E399**. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. In: ASTM Volume 03.01, Metals - Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography: 2008. 33p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1290**. Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement. In: ASTM Volume 03.01, Metals - Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography: 2008. 15p.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook, vol. 8. Mechanical Testing, Metals Park, Ohio, 1985.

ANGAMUTHU, K., GUHA, B., Abd ACHAR, D. R. G. Investigation of dynamic fracture toughness (J_{Id}) behavior of strength mis-matched Q & T steel weldmenst using instrumented Charpy impact testing. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 64, p. 417-432, 1999.

BARSOM, J. M. The development of the AASHTO Fracture-Toughness Requirements for Bridge Steels. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 7, n. 3, p. 605-618, 1975.

BARSOM, J. M., ROLFE, S. T. Correlations between K_{IC} and Charpy V-notch test results in the transition temperature range. In: **Impact Testing of Materials**. STP 466, ASTM, Philadelphia, 1979, p. 281-302.

BÖHME, W., KALTHOFF, J. F. The behavior of notched bend specimens in impact testing. **International Journal of Fracture**, v. 20, p. 139-141, 1982.

BÖHME, W., KALTHOFF, J. F. On the quantification of dynamic effects in impact loading and the practical application for K_{Id} determination. **Journal de Physique**, Colloque C5, n. 8, t. 46, p. 213-218, 1985.

BÖHME, W. Scatter of a ferritic steel in the transition region analyzed by Charpy tests and dynamic tensile tests. **Nuclear Engineering and Design**, v. 188, p. 149-154, 1999.

BROEK, D. Failure analysis and fracture mechanics. In: POWELL, G. W., MAHMOUD, S. E. (Coord.) ASM handbook: Failure analysis and prevention. 9th ed. Ohio: ASM, 1995. p.47-65.

CHI, Y. C., LEE, S., CHO, K., DUFFY, J. The effects of tempering ant temperature on the dynamic fracture iniciation behavior o fan AISI 4340 VAR steel. **Materials Science and Engineering**, v.114, p. 105-126, 1989.

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

DELFORGE, D. Y. M. **Instrumentação de um pêndulo para ensaio de impacto Charpy**. 1994. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas.

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

ERNEST, H., PARIS, P. C., ROSSOW, M., HUTCHINSON, J. W. Analysis of Load-Displacement Relationship to Determine J-R Curve and Tearing Instability Material Properties. In. **ASTM STP 677**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1979, p. 581-599.

FERNÁNDEZ-CANTELI, A., ARGÜELLES, A., VIÑA, J., RAMULU, M., KOBAYASHI, A. S. Dynamic fracture toughness measurements in composites by instrumented Charpy testing: influence of aging. **Composites Science and Technology**, v. 62, p. 1315-1325, 2002.

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

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 14.556**. Steel - Charpy V-notch pendulum impact test - instrumented test method. Geneva, 2000. 14p.

IRELAND, D. R. Procedures and Problems associated with reliable control of the Instrumented Impact test. In. **Instrumented Impact Testing, ASTM STP 563**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1974, p. 3-29.

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

IRWIN, G. R. Fracture Dynamic, Fracturing of Metals. American Society for Metals. Cleveland p. 147-66. 1948.

KALTHOFF, J. F., WINKLER, S., BÖHME, W. A novel procedure for measuring the impact fracture toughness K_{Id} with precracked Charpy specimens. **Journal de Physique**, Colloque C5, n. 8, t. 46, p. 179-186, 1985.

KALTHOFF, J. F. On the measurement of dynamic fracture toughness – a review of recent work. **International Journal of Fracture**, v. 27, p. 277-298, 1985.

KOBAYASHI, T., Measurement of Dynamic Fracture Toughness J_{id} by Instrumented Charpy Test. **International Journal of Fracture**, vol. 23, p. 105-109, 1983.

KOBAYASHI, T. Progress in the instrumented Charpy impact test. **Materials Science Research International**, v. 8, n. 3, p. 141-150, 2002.

KOBAYASHI, T., YAMAMOTO, I., NINOMI, M. Evaluation of dynamic fracture toughness parameters by instrumented Charpy impact test. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 24, n. 5, p. 773-782, 1986.

KOBAYASHI, T., YAMAMOTO, I., NINOMI, M. On the accuracy of measurement of dynamic elastic-plastic fracture toughness parameters by the instrumented Charpy test. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 26, n. 1, p. 83-94, 1987.

KOBAYASHI, T., MTSUNUMA, K., IKAMA, H. Evaluation of static and dynamic fracture toughness in ceramics. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 31, n. 5, p. 873-885, 1988.

KOBAYASHI, T., NINOMI, M. Evaluation of dynamic crack initiation and growth toughness by computer aided Charpy impact testing system. **Nuclear Engineering and Design**, v. 111, p. 27-33, 1989.

KOBAYASHI, T., YAMAMOTO, I., NINOMI, M. Introduction of a new dynamic fracture toughness evaluation system. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 21, n. 3, p. 145-153, 1993.

KOBAYASHI, T., TODA, H. & MASUDA, T. Analysis of test data obtained from Charpy-V and impact tensile test. In: Charpy Centenary Conference, France, 2001. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier. p. 305-312, (ESIS Publication, 30), 2001.

KISHIMOTO, K., AOKI, S., SAKATA, M., Simple formula for Dymanic Stress Intensity Factor of Pre-Cracked Charpy Specimen. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 13, p. 501-508, 1980.

LORRIOT, T., MARTIN, E., QUENISSET, J.M., SAHRAOUI, S., LATAILLADE, J.L. A Methodological Improvement of Dynamic Fracture Toughness Evaluations Using an Instrumented Impact Tester, **Journal de Physique**, Colloque C8, supplément au Journal de Physique III, v. 4, p. 125-130, 1994.

LORRIOT, T. Specimen loading determined by displacement measurement in Instrumented Charpy Impact test. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 65, p. 703-713, 2000.

LORRIOT, T., LANDREIN, P., & GUILLAUMAT, L. Influence of some test parameters on specimen loading determination methods in Instrumented Charpy impact tests. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 68, p. 1631-45, 2001.

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. In: Charpy Centenary Conference, France, 2001. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier. p. 45-60, (ESIS Publication, 30), 2001.

MANAHAN, M. P. & STONESIFER, R. B. Studies toward optimum instrumented striker designs. In: Charpy Centenary Conference, France, 2001. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier. p. 151-162, (ESIS Publication, 30), 2001.

MORITA, S., OTANI, M. & KOBAYASHI, T. Problems related to the measurement of load signal in the Instrumented Charpy impact test. In: Charpy Centenary Conference, France, 2001. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier. p. 135-142, (ESIS Publication, 30), 2001.

NOGUEIRA, F. C. **Influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT 4340**. 2006. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

PEROSANZ, F. J., SERRANO, M., MARTÍNEZ, C. Cálculo de la tenacidad de fractura a través de ensayos dinámicos. **Revista Metalurgia Madrid**, v. 34, p. 399-406, 1998.

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

RINTAMAA, R. Single Specimen Fracture Toughness Determination Procedure Using Instrumented Impact Test. In. Technical Research Centre of Finland. **Research Report**, Finlandia, 1993, p. 17-24.

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

RODRIGUES, A. R; TOKIMATSU, R. C. Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica Aparente a Liga de Alumino AI7050 por meio do Ensaio Charpy Utilizando diferentes Transdutores. **Material Science**, v. 2, p. 224-232, 2001.

ROLFE, S. T., BARSOM, J. M. Fracture and Fatigue Control in Structures. **Applications of Fracture Mechanics**, Prentice-Hall, 1977.

SÁNCHEZ, L., GUITÉRREZ-SOLANA, F. Correlation between impact resistance and fracture toughness in aged duplex stainless steels. In: Charpy Centenary Conference, France, 2001. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier. p. 297-304, (ESIS Publication, 30), 2001.

SAILORS, R. H., CORTEN, H. T. Relationship between material fracture toughness using fracture mechanics and transition temperature tests. In: **Fracture Toughness, Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics**, STP 514, Part II, ASTM, Philadelphia, 1972, p. 164-191.

SERVER, W. L. Instrumented Charpy test review and application to structural integrity. In: Charpy Centenary Conference, France, 2001. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier. p. 843-850, (ESIS Publication, 30), 2001.

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

SERVER, W. Standard Charpy impact test. In: NEWBY, J. R. (Coord.) ASM Handbook: **Mechanical Testing**. 9th ed. Ohio: ASM, 1995. p. 262-275.

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

TANGUY, B., BESSON, J., PIQUES, R., PINEAU, A. Numerical modeling of Charpy V-notch tests. In: Charpy Centenary Conference, France, 2001. **Proceedings**. Amsterdam: Elsevier. p. 737-744, (ESIS Publication, 30), 2001.

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

TOKIMATSU, R. C., FERREIRA, I. Inconvenientes e Confusões Decorrentes da Classificação de Fraturas Segundo a Base Dual Dútil-Frágil. In. 53º Congresso anual da ABM, 1998, **Anais**, 1998, Belo Horizonte, p. 17.

TOTI, F. A. **Tenacidade à Fratura Dinâmica de uma Liga de alumínio de Alta Resistência AMS 7475T7351**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TRONSKAR, J.P., MANNAN, M.A., LAI, M.O. Direct measurement of displacement in Instrumented Charpy impact testing for Structural Integrity Assessment. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 29, n. 3, p. 246-57, 2001.

TRONSKAR, J.P., MANNAN, M.A., LAI, M.O. Correlation between quasi-static and dynamic crack resistance curves: **Engineering Fracture Mechanics**, v. 70, p. 1527-1542, 2002.

VIDOTTO, G. J. **Calibração estática e dinâmica da célula de carga conforme norma ISO 14.556 destinada à instrumentação do ensaio Charpy convencional.** 2003. Relatório FAPESP, Processo nº 01/11568-0, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

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

YAMAMOTO, I. Introduction of a New Dynamic Fracture Toughness Evaluation System, **Journal of Testing and Evalution**, v. 21, n. 3, p. 145-53, 1993.

YOKOYAMA. T. Determination of dynamic fracture initiation toughness using a novel impact bend test procedure. **Journal of Pressure Vessel Technology**. V. 115, p. 389 – 397, 1993.

Anexo 1

Rotina computacional para determinar a curva de resposta do impacto

A rotina a seguir determina a curva de resposta ao impacto proposta por Kalthoff et al. (1985). A rotina foi desenvolvida diante das considerações matemáticas descritas no item 2.3 do Capítulo 2, utilizando a linguagem de programação Matlab 6.0. O resultado da rotina é o gráfico da curva de resposta ao impacto apresentado no item 4.5.3 do Capítulo 4.

As variáveis de entrada da rotina são:

- Comprimento da trinca, a, em mm;
- Largura do corpo de prova, W, em mm;
- Velocidade inicial do martelo, V_0, em m/s;
- Flexibilidade da máquina de ensaio de impacto, C_m, m/N. O valor médio para máquinas de ensaio de impacto Charpy convencional com capacidade de 300J é de $8{,}1*10^{-9}$m/N (Ireland, 1977). Este valor foi considerado neste trabalho.

```
clc
clear all
disp('##################################################################')

disp('Determinação da Curva de Resposta ao Impacto de J.F. Kalthoff,')

disp( S. Winkler e W. Bohme, artigo publicado no JOURNAL DE PHYFIQUE')

disp('            Colloque C5, n8, Tome 46, 1985'                    )

disp('##################################################################')


disp('====ENTRADA DE DADOS====')

a= input('Entre com o comprimento do entalhe a [mm] =   ');

w= input('Entre com a largura do corpo-de-prova W [mm] =   ');

v = input('Entre com a velocidade inicial de impacto Vo [m/s] =   ');

Cm= input('Entre com a flexibilidade da maquina Cm [m/N] (formato da entrada
8.1e-9) =   ');


disp('Calculo da constatnte R em [GN/m^(5/2)] ')

r=(1.276/(1+0.276*(Cm/8.1e-9)));

R=r*301;

R
```

```
%##########Calculo de t` para a (comprimento de trinca) #########

t=0:2:298; %tempo no ensaio medido em us - microsegundos
                      %definido em 300 pontos

tn=t*[1-0.62*((a/w)-0.5)+4.8*((a/w)-(0.5)^2)];

tt=0:2:298;

ts=[0 0 2 4 6 9 13 17 20 24 28 30 33 35 36 38 39 40 42 43 45....
        46 47 46 45 45 46 49 53 57 61 65 69 72 73 73 72 70 69 68....
        69 70 75 81 88 94 100 106 111 116 118 119 118 117 115 115....
        115 115 116 118 120 122 124 126 128 129 130 131 132 134....
        136 138 141 145 148 152 155 157 159 161 164 166 169 172....
        175 177 180 183 185 187 188 188 187 186 185 186 187 189....
        192 195 198 202 204 207 210 212 212 213 213 214 216 219....
        222 225 230 233 236 239 241 243 244 245 245 245 245 245....
        245 245 246 249 251 253 255 257 258 260 261 262 265 267....
        269 272 275 277 280 282 284 286 288 289];
%Valores de t" para o correspondente t' da tabela


            %###############Interpolaçao dos tempos##############


tns=zeros(1,150);
 for i=1:length(tn)-1
    for j=1:length(tn)-1
        if tn(i)<tt(j) & tn(i)>=tt(j-1)
            tns(i)=(((ts(j+1)-ts(j))/(tt(j+1)-tt(j)))*(tn(i)-tt(j)))+ts(j);
        end
    end
end
 KIDN=(R*tns*v)/1E3;
```

```
%###############Plotar a Curva de Resposta ao Impacto##############


figure (1)

plot(tn,KIDN)

xlabel('Tempo de fratura, us')

ylabel('Fator de INtanesidade de Tensao, MN/m^3/2')

grid on
```

Anexo 2

Curvas de ensaios de impacto instrumentado e fractografias

A seguir são apresentados curvas de resposta do ensaio de impacto instrumentado obtidas a partir do sistema de medida desenvolvido. São apresentadas também as fractografias das condições microestruturais ensaiadas nas respectivas curvas de impacto. O objetivo é apresentar de forma resumida as propriedades obtidas e a rápida visualização do comportamento da curva e do micromecanismo de fratura. Os resultados apresentados seguem uma ordem. Inicialmente serão apresentado os resultados dos corpos de prova com entalhe arredondado e em seguida os resultados dos corpos de prova com entalhe agudo ensaiados dinamicamente.

O resultado de corpo de prova submetido ao ensaio de impacto instrumentado é apresentado em quatro curvas. As curvas são:

- Força em função do tempo;
- Força em função do deslocamento estimado;
- Força e Energia absorvida em função do tempo e;
- Força e Energia absorvida em função do deslocamento estimado.

As fractografias apresentadas referem-se a regiões de fratura total e uma região próxima ao centro do corpo-de-prova.

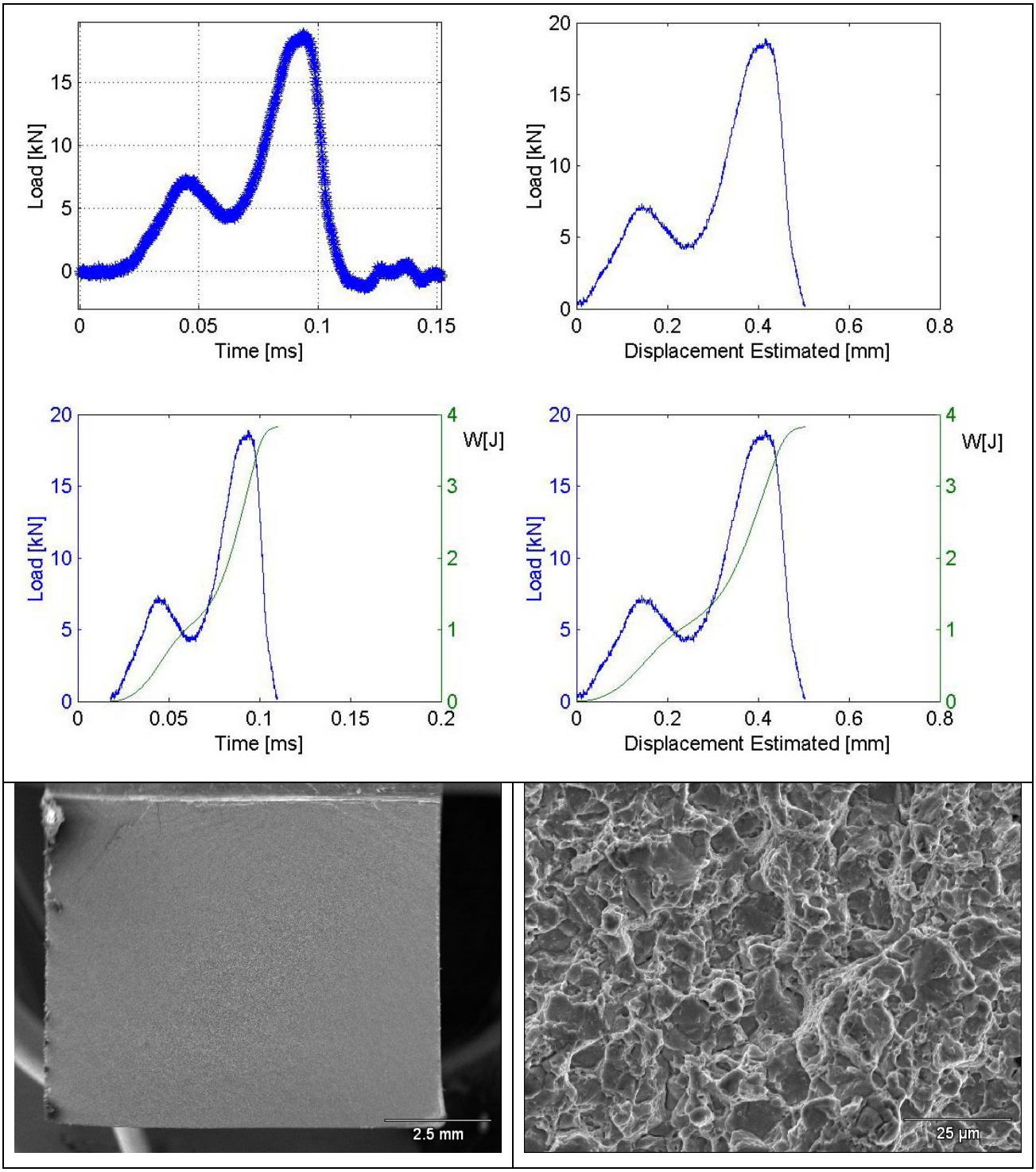


Figura A.1 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de como temperado e entalhe arredondado.

Dureza HRC	59,1(0,9)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	13,7(1,1)	Energia global [J]	3,8(0,2)
Limite de Escoamento [MPa]	1885,5 (66,3)	Força Máxima [kN]	18,8(1,5)		
Limite de Resistência [MPa]	2177,7 (72,5)	Classificação (ISO): A			

* Desvio Padrão

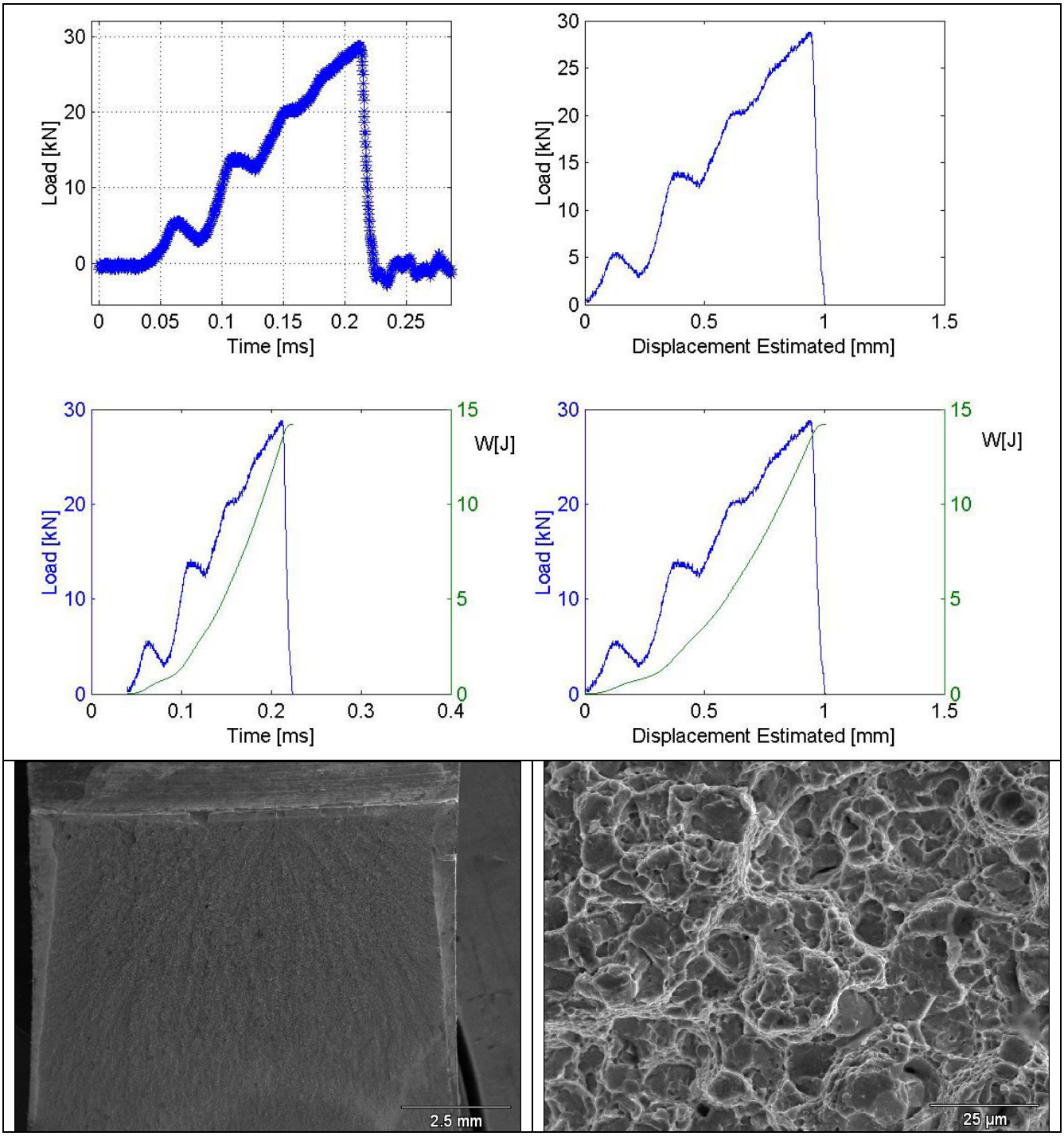


Figura A.2 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 473K e entalhe arredondado.

Dureza HRC	56,4(0,2)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	26,3(0,7)	Energia global [J]	14,2(0,8)
Limite de Escoamento [MPa]	1725,2(23,8)	Força Máxima [kN]	30,8(1,3)		
Limite de Resistência [MPa]	2083,5(31,5)	Classificação (ISO): A			

* Desvio Padrão

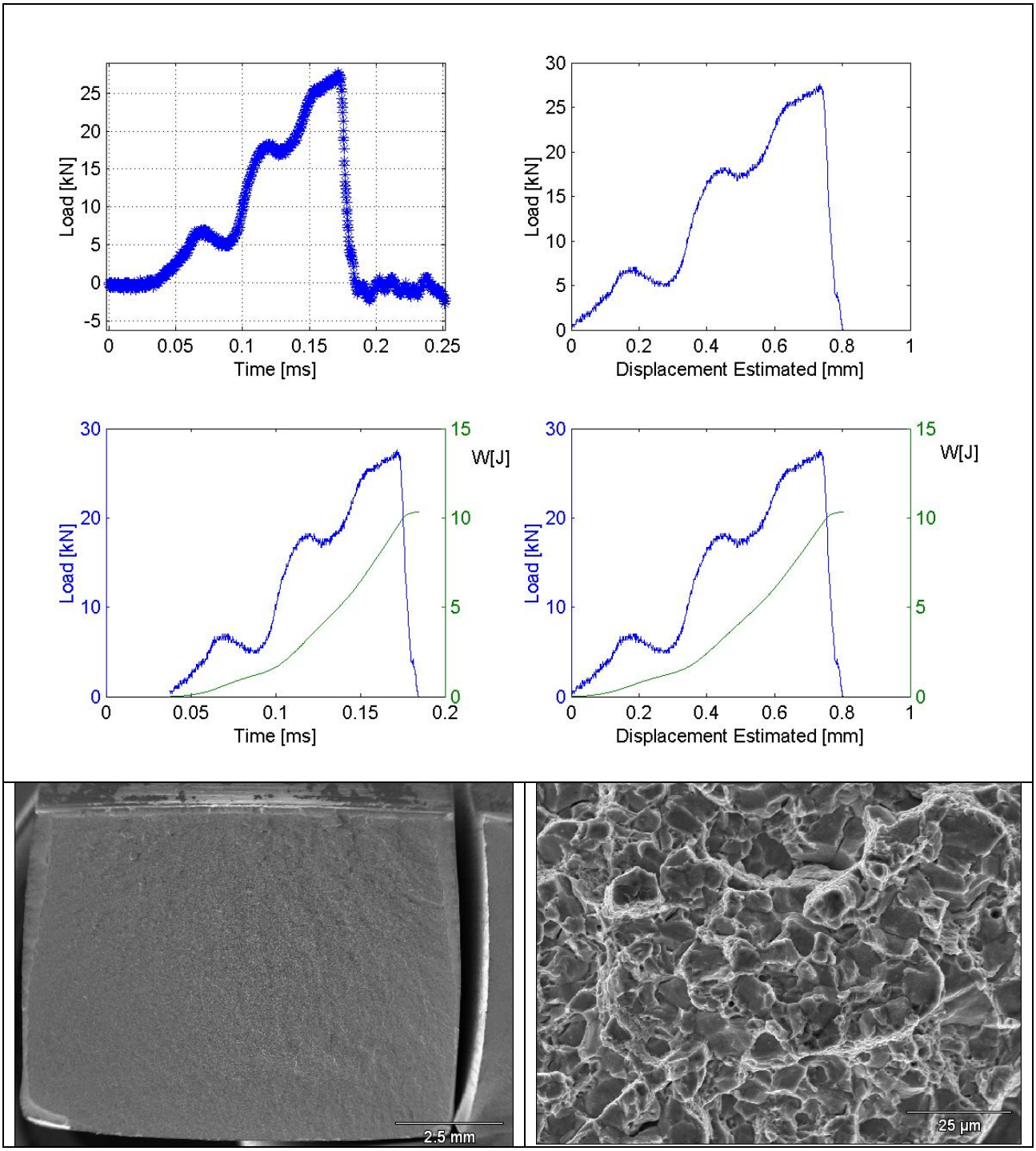


Figura A.3 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 573K e entalhe arredondado.

Dureza HRC	52,7(0,3)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	20,2(0,3)	Energia global [J]	9,8(1,2)
Limite de Escoamento [MPa]	1687,2 (68,2)	Força Máxima [kN]	23,3(3,8)		
Limite de Resistência [MPa]	1846,6 (52,2)	Classificação (ISO): A			

* Desvio Padrão

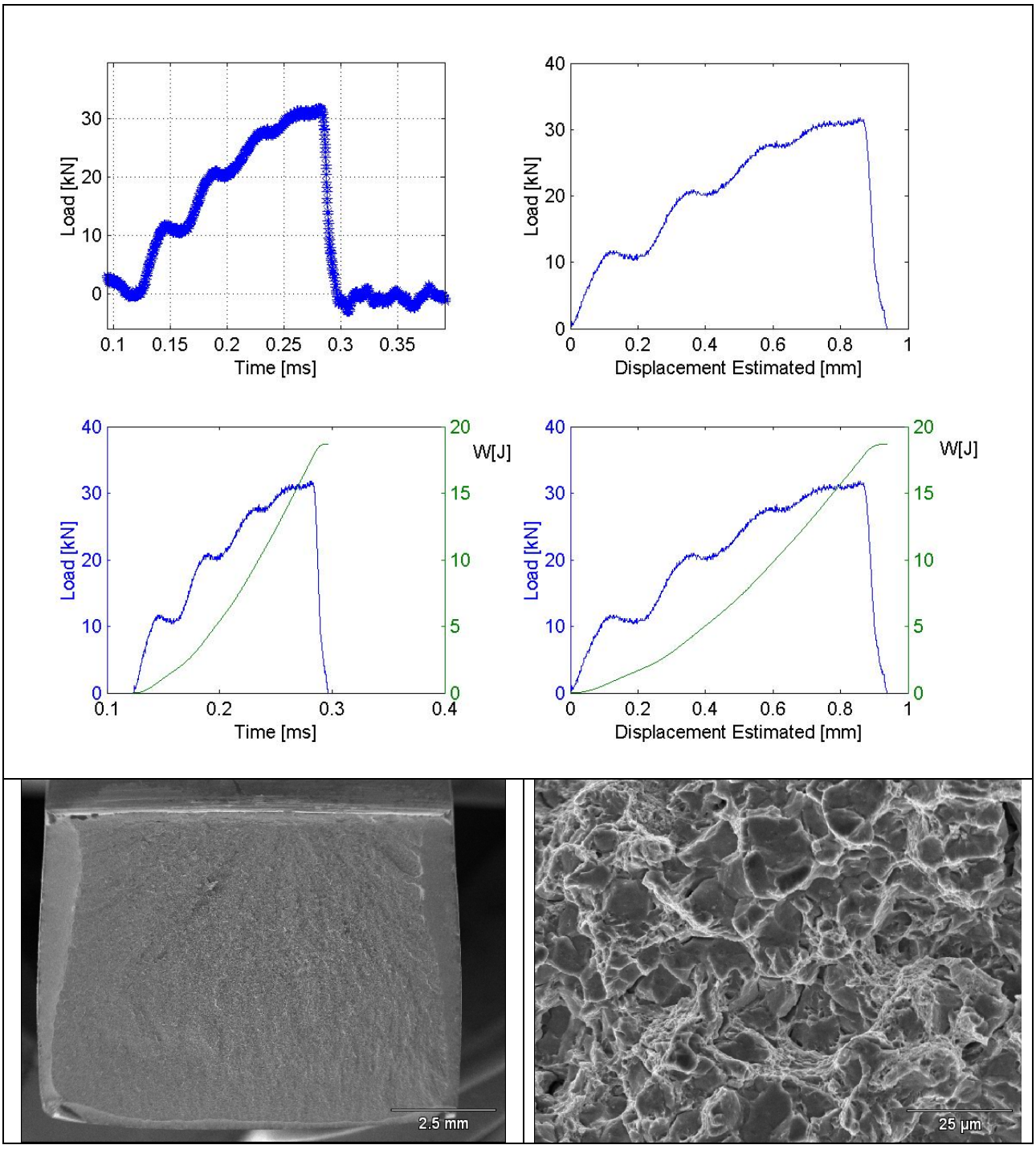


Figura A.4 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 673K e entalhe arredondado.

Dureza HRC	47,9(0,3)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	26,9(0,8)	Energia global [J]	17,6(1,2)
Limite de Escoamento [MPa]	1512,8(42,3)	Força Máxima [kN]	29,8(0,3)		
Limite de Resistência [MPa]	1601,8(28,7)	Classificação (ISO): C			

* Desvio Padrão

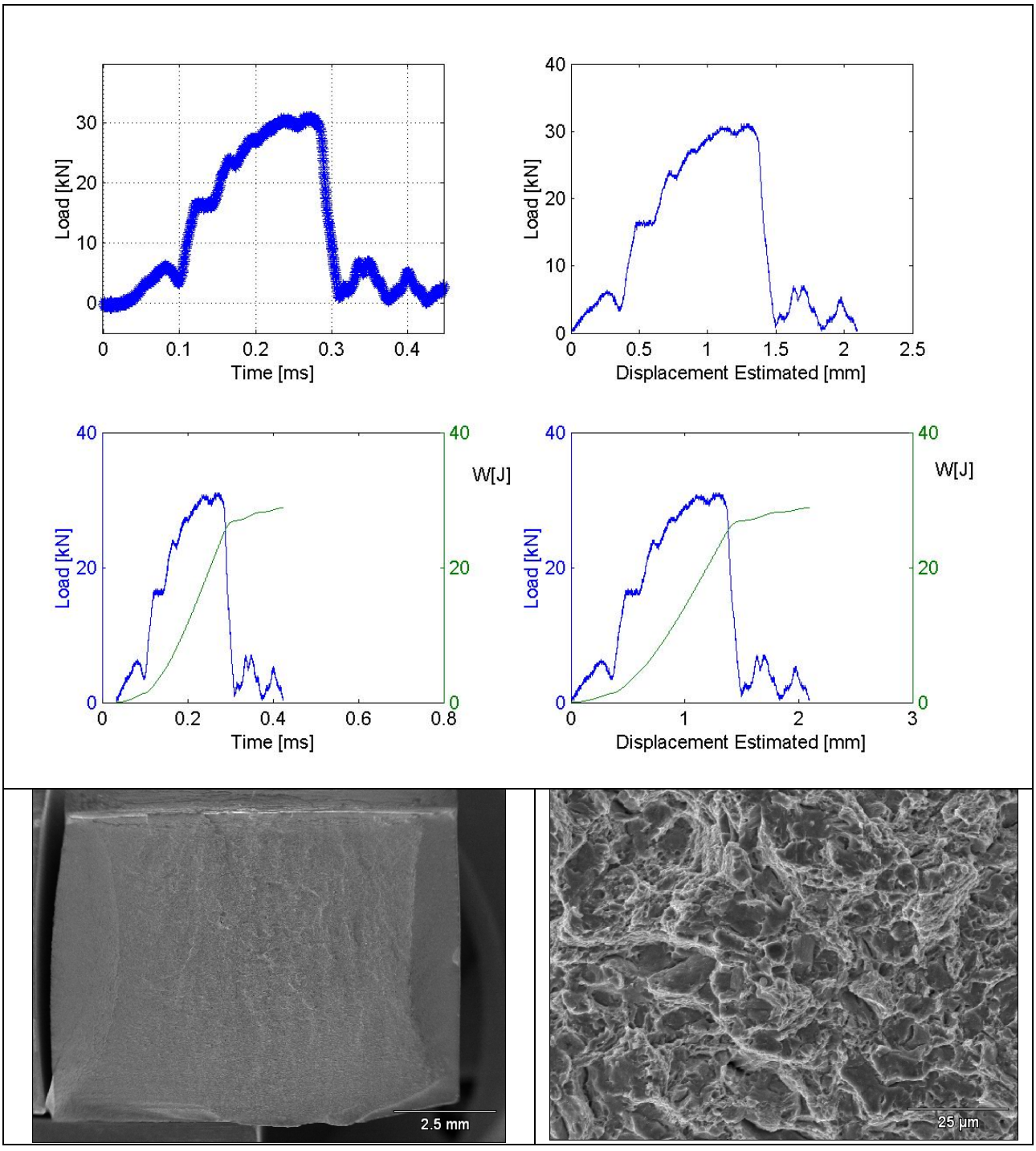


Figura A.5 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 773K e entalhe arredondado.

Dureza HRC	43,2(0,2)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	28,6(0,3)	Energia global [J]	28,7(0,2)
Limite de Escoamento [MPa]	1310,6(18,9)	Força Máxima [kN]	28,7(0,3)		
Limite de Resistência [MPa]	1362,5(17,1)	Classificação (ISO): C			

* Desvio Padrão

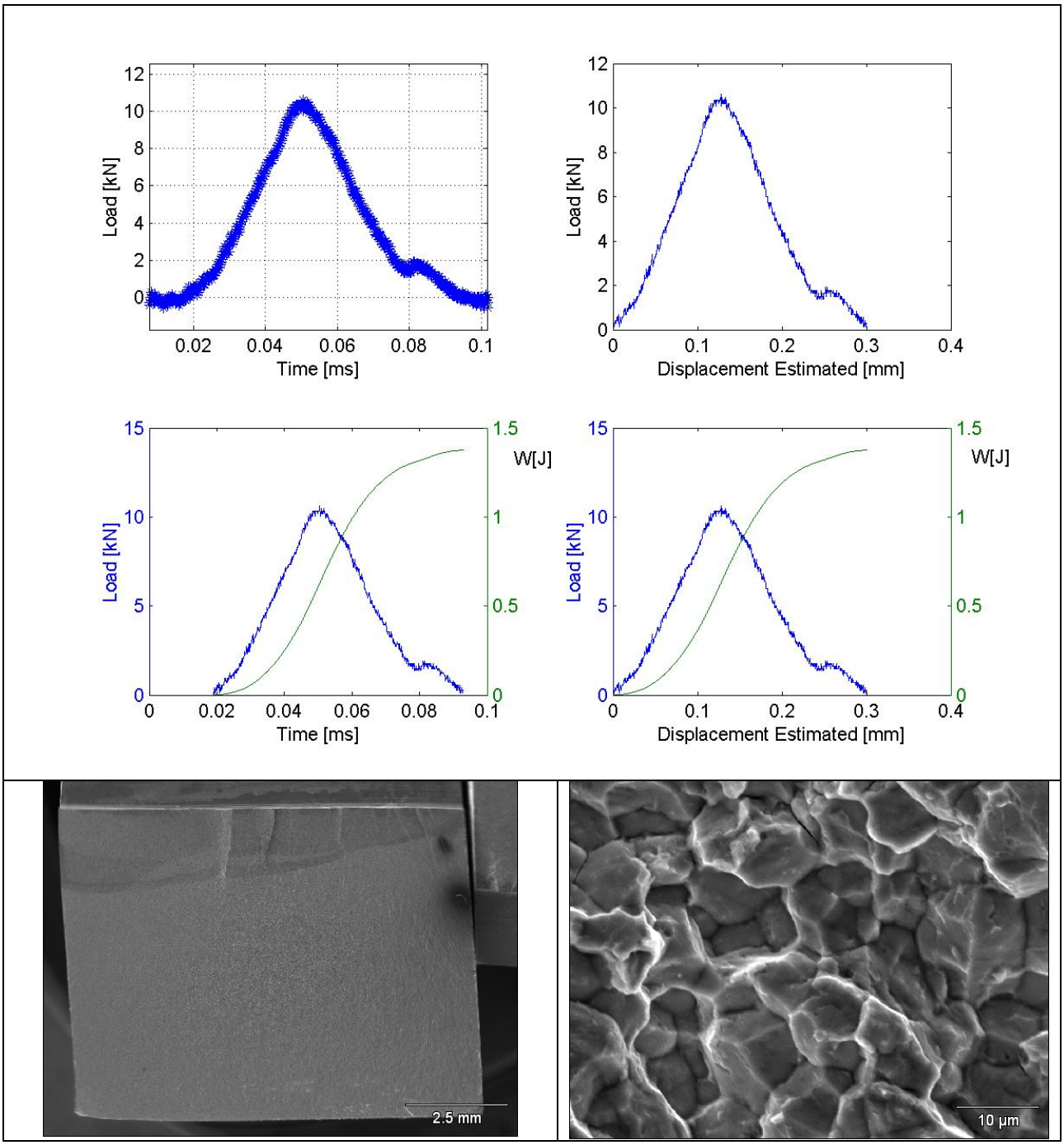


Figura A.6 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de como temperado e corpo de prova com pré trinca.

Dureza HRC	59,1(0,9)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	1,6(0,7)		
Limite de Escoamento [MPa]	1885,5(66,3)	Força Máxima [kN]	10,1(1,0)	Energia global [J]	1,7(0,1)
Limite de Resistência [MPa]	2177,7 (72,5)	Classificação (ISO): não identificado.			

* Desvio Padrão

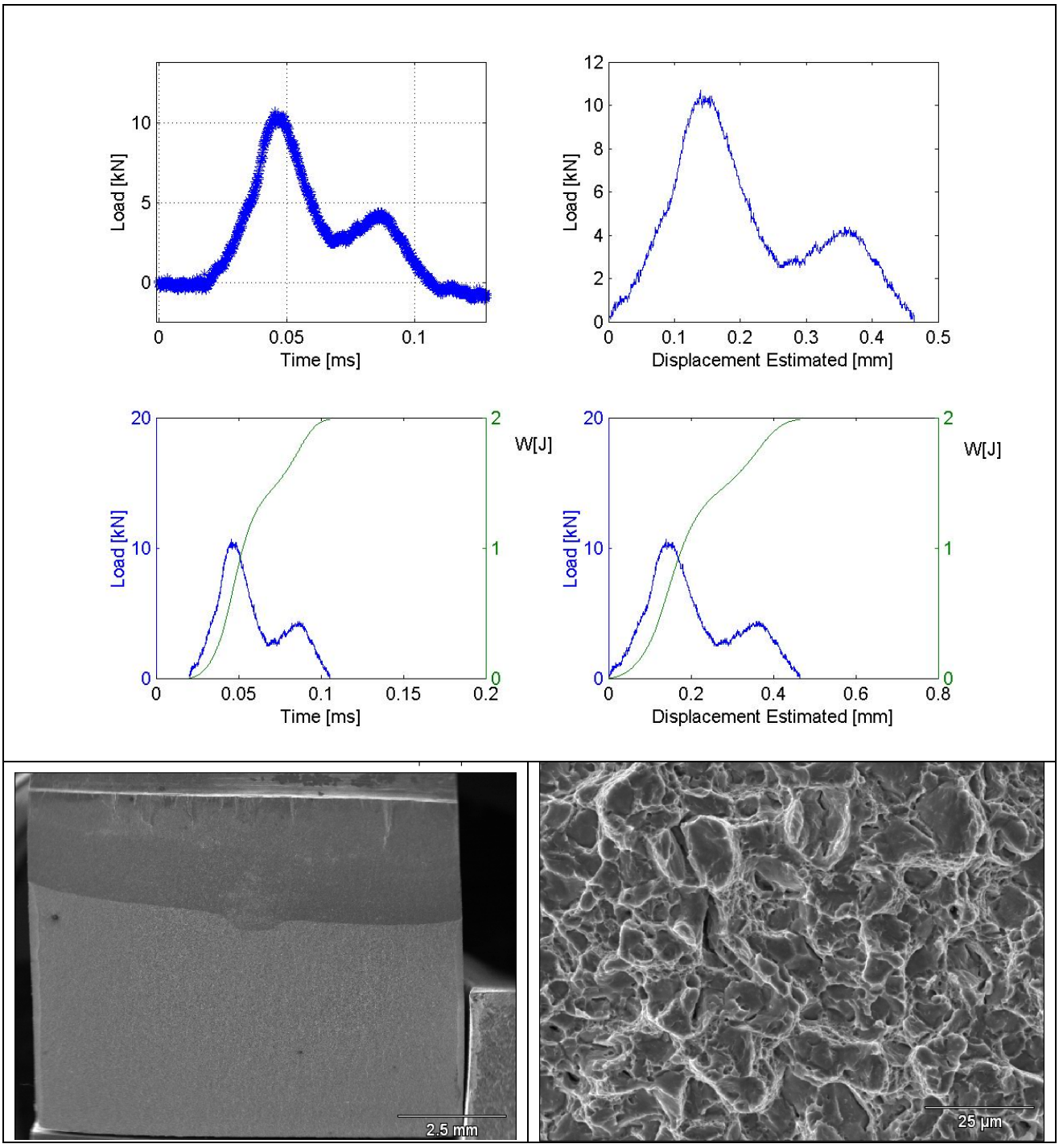


Figura A.7 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 473K e corpo de prova com pré trinca.

Dureza HRC	56,4(0,2)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	3,6(1,2)	Energia global [J]	2,3(0,1)
Limite de Escoamento [MPa]	1725,2(23,8)	Força Máxima [kN]	9,0(1,0)		
Limite de Resistência [MPa]	2083,5(31,3)	Classificação (ISO): não identificado.			

* Desvio Padrão

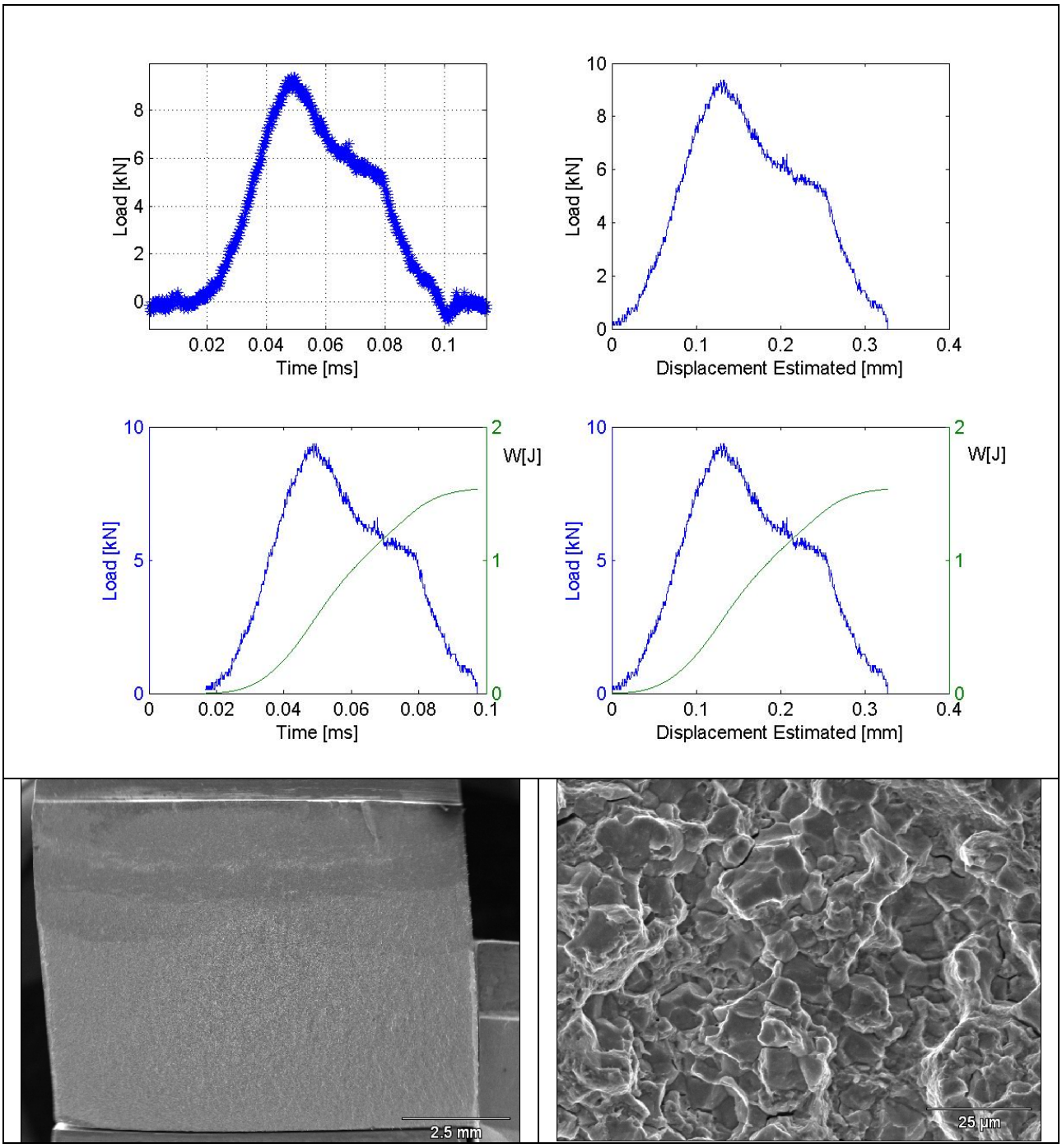


Figura A.8 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 573K e corpo de prova com pré trinca.

Dureza HRC	52,7(0,3)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	2,8(0,3)	Energia global [J]	2,1(0,2)
Limite de Escoamento [MPa]	1687,2(68,2)	Força Máxima [kN]	7,0(0,3)		
Limite de Resistência [MPa]	1846,6(52,2)	Classificação (ISO): não identificado.			

* Desvio Padrão

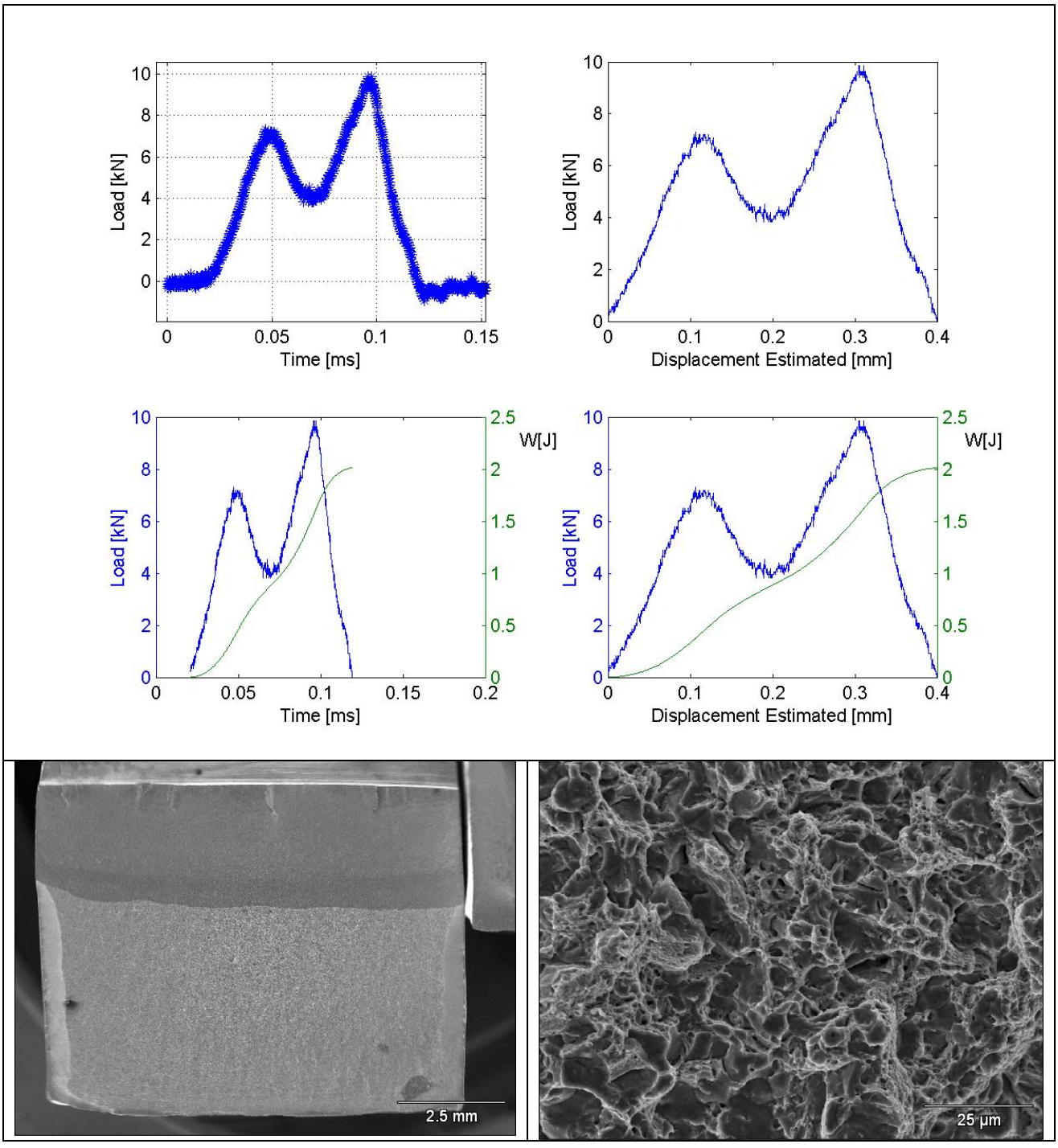


Figura A.9 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 673K e corpo de prova com pré trinca.

Dureza HRC	47,9(0,3)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	4,5(0,1)	Energia global [J]	2,8(0,3)
Limite de Escoamento [MPa]	1512,8(42,3)	Força Máxima [kN]	9,3(0,8)		
Limite de Resistência [MPa]	1601,8(28,7)	Classificação (ISO): não identificado.			

* Desvio Padrão

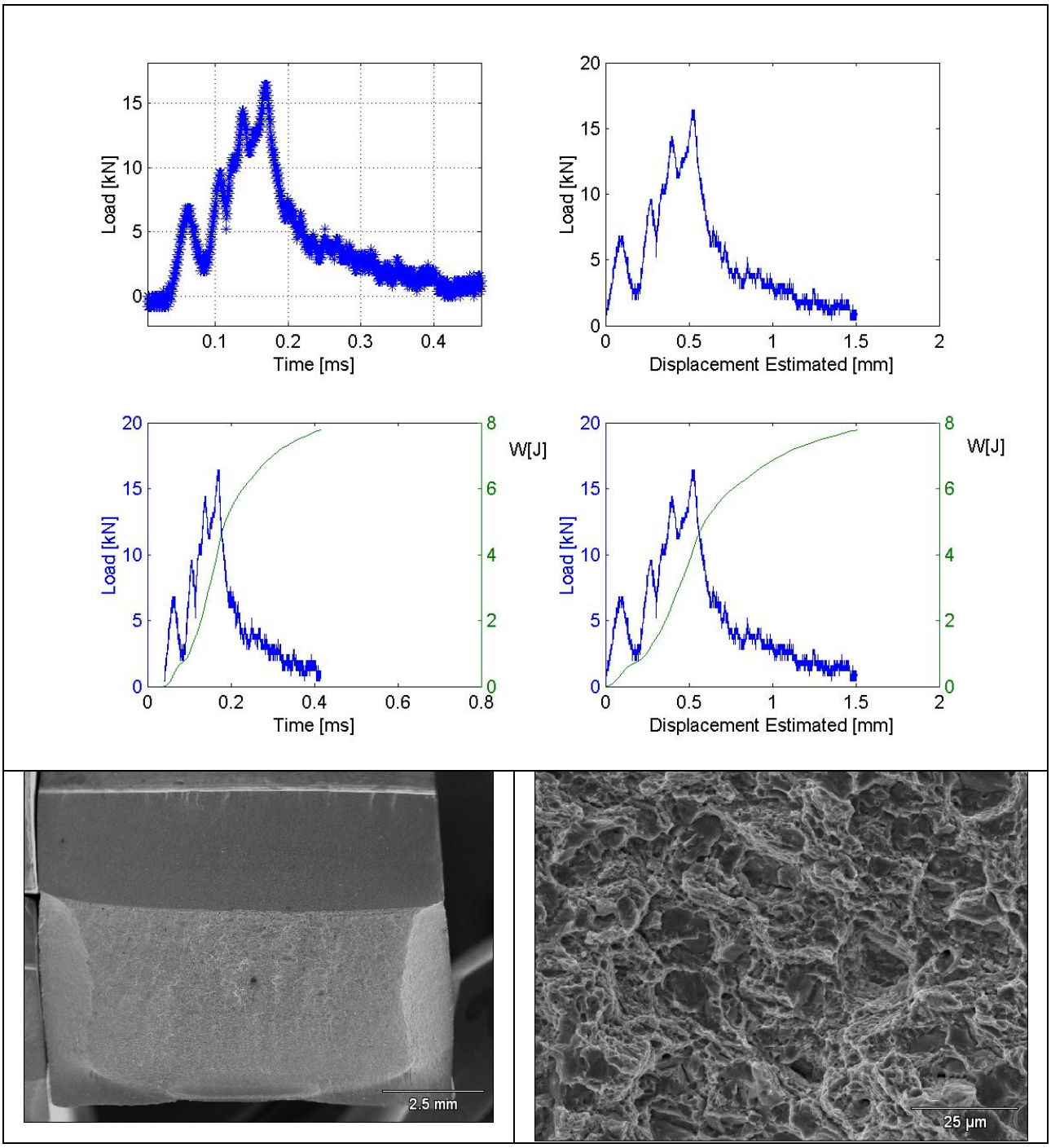


Figura A.10 – Curva do ensaio de impacto instrumentado na condição de revenido a 773K e corpo de prova com pré trinca.

Dureza HRC	43,2(0,2)*	Força de Iniciação de trinca [kN]	9,1(0,7)	Energia global [J]	10,3(0,1)
Limite de Escoamento [MPa]	1310,6(18,9)	Força Máxima [kN]	12,7(0,5)		
Limite de Resistência [MPa]	1362,5(17,1)	Classificação (ISO): C.			

* Desvio Padrão