

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA DE UMA LIGA DE
ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA AMS 7475 T7351.**

FRANCISCO DE ASSIS TOTI

Dissertação apresentada à Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Dirceu Spinelli

São Carlos – 2004

*A minha esposa Maria e aos meus
filhos Mateus, Gabriela e Maria Beatriz*

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Dirceu Spinelli pela oportunidade, pelo conhecimento adquirido e por sua confiança durante ao longo deste trabalho.

Ao co-orientador Prof. Dr. José Ricardo Tarpani pelo seu apoio e pelo conhecimento adquirido.

Ao Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho pelo apoio.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Mecânica da FATEC – SOROCABA, pelo incentivo e apoio.

Ao Dr. Marcelo Tadeu Milan pela colaboração.

Ao Alessandro Roger Rodrigues pelo desenvolvimento do programa computacional utilizado neste trabalho.

Aos amigos : MSc. Kleber Mendes Figueiredo, MSc. Maria Heloisa Braz, MSc. Cassius O. F. T.Ruckert e MSc. Omar Maluf pela colaboração.

A todos os professores e ao Diretor do Colégio Industrial SALES GOMES pelo incentivo e apoio.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC/USP que, direta e indiretamente, colaboraram com este trabalho.

A EMBRAER pelo fornecimento da liga de Alumínio AMS 7475 T7 351.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
1- INTRODUÇÃO.....	1
2-OBJETIVOS.....	3
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1- Introdução ao conceito de tenacidade à fratura.....	5
3.2- A Mecânica da fratura.....	7
3.3- Mecânica da fratura elástica linear (MFEL).....	9
3.3.1- Fator de intensidade de tensão.....	12
3.4- Mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP).....	16
3.4.1- A operacionalização da integral – J.....	18
3.5- Ensaio de impacto.....	20
3.5.1- Limitações e campo de aplicação do ensaio Charpy.....	21
3.6- Ensaio de impacto instrumentado.....	22
3.7- Tenacidade à fratura dinâmica.....	26
3.7.1 Métodos para a estimativa dos valores de tenacidade à fratura dinâmica.....	26
3.8- Tipos de fratura.....	27
3.8.1- Fratura dúctil.....	28
3.8.2- Fratura frágil.....	28
3.9- Expressões matemáticas para o cálculo da tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástica, J_{Id}	29
3.10- Expressões matemáticas para o cálculo da tenacidade à fratura dinâmica elástica linear, K_{Id}	32
3.11- Derivação de J_{Id} a partir de K_{Id}	33
	34

4- MATERIAIS E MÉTODOS.....	
4.1- Material.....	34
4.2- Confeção dos corpos de prova Charpy.....	35
4.3- Análise microestrutural.....	37
4.4- Análise quantitativa de segundas fases.....	37
4.5- Análise química.....	38
4.6- Ensaio de impacto Charpy instrumentado.....	39
4.7- Programa computacional para a determinação do início do crescimento dúctil segundo o método da taxa de variação da flexibilidade elástica.....	41
4.7.1- Aplicação do programa computacional de determinação do ponto de início de crescimento dúctil da trinca.....	45
4.8- Análise do perfil de fratura dos corpos de prova fraturados por impacto.....	50
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1- Análise microestrutural.....	52
5.2- Análise quantitativa de segundas fases.....	53
5.3- Análise química.....	55
5.4- Resultados dos ensaios de impacto Charpy instrumentado.....	56
5.4.1- Gráficos obtidos nos ensaios de impacto instrumentado de corpos de prova entalhados e pré-trincados.....	57
5.4.2-Determinação do ponto real de início de propagação da trinca através do método da taxa de mudança da flexibilidade elástica.....	67
5.5- Tenacidade à fratura dinâmica elasto- plástica, J_{Id}	70
5.6- Tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} calculada por meio de J_{Id}	72
5.7- Tenacidade à fratura dinâmica elástica-linear, K_{Id} de carga máxima e de carga de início de propagação.....	74
5.8- Tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , calculada	

a partir de K_{Id}	76
5.9- Critérios de validade do ensaio de tenacidade à fratura dinâmica.....	77
5.10- Comparação dos resultados de tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , com os de tenacidade à fratura quase estática, K_{Ic}	82
5.11- Estimativa da superfície real de fratura sob impacto.....	84
6- CONCLUSÕES	98
7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
8- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	101
9-Anexo A- sinais sem tratamento gerados pelo equipamento.....	105
10- . Anexo B - curvas sem tratamento x tratadas.....	119
11- Anexo C – Tabelas.....	129

LISTA DE FIGURAS

TEXTO PRINCIPAL

Figura 1 - Curva tensão-deformação de engenharia [6].....	6
Figura 2 – Variáveis abordadas na mecânica da fratura.....	8
Figura 3 – Sistema de coordenadas e estado de tensões em um elemento de volume situado próximo à ponta da trinca [8].....	9
Figura 4 – Modos de carregamento para a abertura de trinca [9].....	10
Figura 5 – Tensões próximas à frente de uma trinca em um sólido elástico [9].....	13
Figura 6 – Tensão normal ao plano da trinca de modo I [9].....	15
Figura 7 a – Comportamento elástico não-linear de um corpo sólido. (b) A integral-J idealizada para o comportamento elasto-plástico [10].....	17
Figura 8 - Esquematização experimental para a definição básica da Integral-J em barras trincadas (sob carregamento). em flexão em três pontos [10].....	19
Figura 9 – A integral-J como função da área sob a curva P- δ [10].....	19
Figura 10 – (a) Máquina de ensaio de impacto instrumentado Charpy. (b) Conjunto completo da máquina (c) Estrutura mecânica da máquina. (d) Parte instrumentada. (e) Detalhe do martelo próximo do corpo de prova a ser submetido ao ensaio.....	24
Figura 11 – Curva de carga vs deslocamento durante um ensaio de impacto Charpy instrumentado	25
Figura 12 – Método da taxa da variação da flexibilidade	

elástica [23].....	31
Figura 13 - (a) Detalhes do corpo de prova entalhado. (b) com pré-trincamento utilizado no ensaio de impacto Charpy, conforme a norma ASTM E23 [12].....	36
Figura 14 - Direções principais da placa forjada, mostrando a orientações dos corpos de prova segundo as orientações de carregamento e propagação de trinca [30].....	36
Figura 15 –Amostra do plano metalográfico S-L apresentando inclusões e intermetálicos. Aumento 100X.....	38
Figura 16 – Curva da carga-tempo-energia registrada durante o ensaio de impacto instrumentado Charpy.....	40
Figura 17 – Curva de carga-deslocamento segundo a orientação T-S apresentando característica frágil após a aplicação do programa computacional pelo critério frágil, indicando o ponto de força máxima, F_m	43
Figura 18 – Curva de carga-deslocamento segundo a orientação T-S apresentando característica frágil após a aplicação do programa computacional pelo critério dúctil. São indicados os pontos de força elástica, F_{el} , de início de propagação de trinca, F_{gy} e máxima, F_m	44
Figura 19 - Curva de carga-deslocamento segundo a orientação L-S apresentando característica dúctil após a aplicação do programa computacional pelo critério dúctil. São indicados os pontos de força elástica, F_{el} , de início de propagação de trinca, F_{gy} e máxima, F_m	45
Figura 20 – Curva de carga-deslocamento na orientação T-L após (a) 5 , (b) 11, (c) 21, (d) 31 e (e) 51 filtragens registradas pelo programa computacional para polimento das curvas.....	48

Figura 21 – Curva de carga-deslocamento na orientação L-S após (a) 5 , (b) 11, (c) 21, (d) 31 e (e) 51 filtragens.registradas pelo programa computacional para polimento das curvas.....	49
Figura 22 - Montagem do perfil de fratura de um corpo de prova entalhado na orientação T-L. Aumento 14X.....	51
Figura 23 – Montagem tridimensional dos principais planos metalográficos da liga de alumínio 7475 – T-7351.....	52
Figura 24– Planos metalográficos ST (a), TL (b) e SL (c) observadas sem ataque, mostrando a distribuição de segundas fases.....	54
Figura 25 – Porcentagens de inclusões, intermetálicos e segundas fases totais nos três planos metalográficos.....	55
Figura 26 – Gráficos de carga-deslocamento dos corpos de prova entalhados nas orientações T-L, T-S, L-T e L-S, respectivamente. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	58
Figura 27 - Curvas de carga-deslocamento dos corpos de prova pré-trincados nas orientações T-L, T-S, L-T e L-S, respectivamente. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	58
Figura 28 - Gráficos de carga-deslocamento na orientação T-L, obtidos de ensaios de corpos de prova entalhados e pré-trincados.Velocidade de carregamento 5,52 m/s.....	59
Figura 29 - Curvas de carga-deslocamento na orientação T-S, obtidos de corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	59
Figura 30 - Gráficos de carga-deslocamento na orientação L-T, obtidos de corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	60

Figura 31 – Curvas de carga-deslocamento na orientação L-S, obtidos a partir de ensaio de impacto de corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	60
Figura 32 - Influência do raio de curvatura do entalhe avaliado nos valores de carga máxima para os cdps entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	61
Figura 33 - Influência do raio de curvatura do entalhe dos valores de carga máxima para os cdps entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	62
Figura 34 – Influência da orientação nos corpos de prova, nos valores percentuais de energia de carga máxima, E_{pm} , energia de propagação de trinca, E_p , dos corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	63
Figura 35 - Influência da orientação dos corpos de prova, nos valores absolutos de energia de carga máxima, E_{pm} , energia de propagação de trinca, E_p , dos corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	63
Figura 36 - Influência da orientação dos corpos de prova, nos valores percentuais de energia de carga de início de propagação da trinca, E_i , e de energia de propagação real, $E_{pm\ real}$, dos corpos de prova entalhados e pré-trincados Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	64
Figura 37 - Influência da orientação dos corpos de prova, nos valores absolutos de energia de carga de início de propagação da trinca, E_i , e de energia de propagação real, $E_{pm\ real}$ dos corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	64

Figura 38 – Influência da orientação, do raio de curvatura do entalhe e do pré-trincamento dos cdps nos valores das relações de energias E_{pm} , E_p , E_t . Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	65
Figura 39 – Influência da orientação dos corpos de prova, nos valores absolutos de energia na carga máxima, E_{pm} , energia de propagação de trinca, E_p , dos corpos de prova pré-trincados, em função da variação da velocidade de carregamento.....	66
Figura 40 – Influência da orientação dos corpos de prova, nos valores absolutos de energia de carga de início de propagação da trinca, E_i , energia de propagação real, $E_{p\ real}$, dos corpos de prova pré-trincados, em função da variação da velocidade de carregamento.....	66
Figura 41 – Valores estimados da energia de escoamento, E_e , energia de início de propagação da trinca, E_i . velocidade de carregamento de 5,52.....	68
Figura 42 – Valores da energia de escoamento, E_e , e da energia de início de propagação da trinca, E_i , em função da velocidade de carregamento para os cdps pré-trincados.....	69
Figura 43 – Valores do limite de escoamento dinâmico, σ_{yd} , na velocidade de carregamento de 5,52 m/s, comparados com os valores de limite de escoamento quase estático, S_e	69
Figura 44 – Valores de tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , obtida por meio da energia de carga máxima, E_{pm} , como função da variação da velocidade de carregamento.....	71
Figura 45 – Valores de tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , obtida Por meio da energia de início de propagação da trinca, E_i em função da variação da velocidade de carregamento	71

Figura 46 – Tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculada utilizando-se os valores de J_{Id} , que foram obtidos dos valores da energia absorvida na carga máxima, E_{pm} , sob diversas velocidades de carregamento.....	73
Figura 47 – Tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculada utilizando-se Os valores de J_{Id} , que foram obtidos dos valores da energia absorvida no início de propagação da trinca, E_i , sob diversas velocidades de carregamento.....	73
Figura 48 – Influência da orientação dos corpos de prova nos valores de tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculados através dos valores de carga máxima, para diversas velocidades de carregamento.....	75
Figura 49 – Influência da orientação dos corpos de prova nos valores de tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculados pelos valores de carga de início da propagação da trinca, para diversas velocidades de carregamento.....	75
Figura 50 – Tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , calculada por meio dos valores obtidos de K_{Id} , utilizando-se valores de carga máxima, P_m , sob diversas velocidades de carregamento.....	76
Figura 51 – Tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , calculada pelos valores obtidos de K_{Id} , utilizando-se valores da carga de início de propagação de trinca, P_i , sob diversas velocidades de carregamento.....	77
Figura 52 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , com base na energia de início de propagação de trinca, E_i , orientações para as quatro de corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.....	78

Figura 53 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , calculada por meio de $K_{Id} P_m$, para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.....	79
Figura 54 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , calculada por meio de $K_{Id} P_i$, para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.....	79
Figura 55 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , com base na energia de carga máxima, E_{pm} , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.....	80
Figura 56 - Critério de validade dos resultados de K_{Id} , obtido pela carga máxima, P_m , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.....	80
Figura 57 - Critério de validade dos resultados de K_{Id} , obtido pela da carga de início, P_i , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.....	81
Figura 58 - Critério de validade dos resultados de K_{Id} , obtido de J_{Id} , Pelos valores da energia de carga máxima, E_{pm} , para as quatro orientações de corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.....	81
Figura 59 - Critério de validade dos resultados de K_{Id} , obtido de J_{Id} por meio dos resultados da energia de início de Propagação de trinca, E_i , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.	82

Figura 60 – Todos os valores obtidos de tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} e tenacidade à fratura estática, K_{Ic} , para as quatro orientações dos corpos de prova.....	83
Figura 61 – Superfície de fratura dos corpos de prova entalhados 001-T-L, 002-T-S, 003-L-T, 004-L-S (a) e pré-trincados 006-T-L, 007-T-S, 008-L-T e 009-L-S (b) ensaiados na velocidade de carregamento de 5,52 m/s.Aumento 2X.....	85
Figura 62 – Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 001 segundo a orientação T-L. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.Aumento 5X.....	86
Figura 63 – Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 002 segundo a orientação T-S.Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.Aumento 5X.....	86
Figura 64– Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 003 segundo a orientação L-T. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.Aumento 5X.....	87
Figura 65 - Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 004 segundo a orientação L-S.Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.Aumento 7X.....	88
Figura 66- Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 006 segundo a orientação T-L. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.....	89
Figura 67 - Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 007 segundo a orientação T-S. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.....	89
Figura 68 - Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 008 segundo a orientação L-T. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.....	90
Figura 69 - Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 009 segundo a orientação L-S. Velocidade de	

carregamento de 5,52 m/s. Aumento 7X.....	91
Figura 70 - Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 093 segundo a orientação L-S. Velocidade de carregamento de 4,0 m/s. Aumento 7X.....	92
Figura 71 - Perfil do caminho da fratura cdp pré-trincado 094 segundo a orientação L-S. Velocidade de carregamento 3,2 m/s. Aumento 7X.....	93
Figura 72– Área verdadeira da superfície de fratura dos cdps entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	94
Figura 73 – Valores de J_{Id} obtidos pela área convencional e a área verdadeira dos corpos de prova pré-trincados velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	96
Figura 74 – Relação da energia total dividida pelas áreas convencional e verdadeira da superfície de fratura dos cdps entalhados e pré-trincados para as quatro orientações	97

ANEXO A

Figura A1 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - entalhado – 001 (orientação T-L), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	106
Figura A2 –(a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp entalhado – 002 (orientação T-S), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	107
Figura A3– (a)Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp entalhado – 003 (orientação L-T), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	108
Figura A4 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp entalhado – 004 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	109
Figura A5 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp pré-trincado – 006 (orientação T-L), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	110
Figura A6 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp pré-trincado – 007 (orientação T-S), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	111
Figura A7 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp pré-trincado – 008 (orientação L-T), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	112

Figura A8 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b).carga-tempo-energia do cdp pré-trincado – 009 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).....	113
Figura A9 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp pré-trincado – 093 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 4,0 m/s, (158 J).....	114
Figura A10 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia (b). carga-tempo-energia do cdp pré-trincado – 094 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 3,2 m/s, (100 J).....	115
Figura A11– (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp pré-trincado - 063 (orientação T-L), velocidade de carregamento de 2,25 m/s, (50 J).....	116
Figura A12 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia e (b) carga-tempo-energia do cdp pré-trincado – 073 (orientação T-S), velocidade de carregamento 2,25 m/s, (50 J).....	117
Figura A13 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b). carga-tempo-energia cdp do pré-trincado – 083 (orientação L-T), velocidade de carregamento de 2,25 m/s, (50 J).....	118

ANEXO B

Figura B1 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 007 pré-trincado (orientação T-S). Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	120
Figura B2 - Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 009 pré-trincado (orientação L-S). Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	121
Figura B3 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 061 pré-trincado – 061 (orientação T-L). Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	122
Figura B4 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 081 pré-trincado (orientação L-T). Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.....	123
Figura B5 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 093 pré-trincado - 093 (orientação L-S). Velocidade de carregamento de 4,0 m/s.....	124
Figura B6 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 094 pré-trincado - 094 (orientação L-S). Velocidade de carregamento de 3,2 m/s.....	125
Figura B7– Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 063 pré-trincado - (orientação T-L). Velocidade de carregamento de 2,25 m/s.....	126
Figura B8 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 073 pré-trincado - (orientação T-S). Velocidade de carregamento de 2,25 m/s	127
Figura B9 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 083 pré-trincado (orientação L-T). Velocidade de carregamento de 2,25 m/s	128

LISTA DE TABELAS

TEXTO PRINCIPAL

Tabela I – Limites mínimo e máximo de composição química da liga de alumínio 7475 na condição T-7351, segundo a norma SAE AMS 2355.....	39
Tabela III – Composição química em % de peso, obtida da liga de alumínio 7475 na condição T-7351, pela técnica de espectrometria de emissão óptica por centelhamento.....	56

LISTA DE TABELAS

ANEXO C	130
Tabela II – Resultados da análise de inclusões e intermetálicos nos planos principais da placa forjada.....	130
Tabela IV- Resultados obtidos dos ensaios de impacto Charpy instrumentado.....	131
Tabela V – Resultados da tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástica, J_{Id} e da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , obtida através da conversão de J_{Id}	132
Tabela VI – Resultados da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} obtida por meio da carga máxima e de início, elasto-plástica, J_{Id} e da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculada por meio de J_{Id}	133
Tabela VII – Resultados da área verdadeira da superfície de fratura dos corpos de prova entalhados e pré-trincados.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a	comprimento de trinca
2a	comprimento total de uma trinca passante em uma placa plana
b _o	ligamento original do corpo de prova
B	espessura do corpo de prova
Cdp	corpo de prova
E	módulo de elasticidade.
E _i	energia de início de propagação de trinca
E _p	energia de propagação de trinca
E _{pm}	energia de carga máxima
E _t	energia total
J	integral – J
J _{Id}	tenacidade à fratura
K	fator de intensidade de tensão
K _I	fator de intensidade de tensão no modo I de abertura de trinca.
K _{IC}	fator de intensidade de tensão crítico em deformação plana – tenacidade à fratura quase estática
K _{Id}	tenacidade à fratura dinâmica
L (S-T, T-S)	plano de fratura longitudinal ou direção metalográfica longitudinal em relação à direção de laminação da placa
MFEL	Mecânica da fratura elástica linear.
MFEP	Mecânica da fratura elasto plástica.
P	carga aplicada
P _m	carga máxima
P _i	carga de início de rasgamento dúctil da trinca
P _e	carga de escoamento
r	distância radial em coordenadas polares
S (T-L, L-T)	plano de fratura perpendicular ou direção metalográfica perpendicular em relação à direção de laminação da placa
S _m	deslocamento de carga máxima

S_t	deslocamento total
T (S-L, L-S)	plano de fratura transversal ou direção metalográfica transversal em relação à direção de laminação da chapa
t_t	tempo total
t_{pm}	tempo de carga máxima
W	largura do corpo de prova
$Y = f(a/W)$	fator geométrico ou de forma.
δ	deflexão ou deslocamento na linha de carga.
θ	coordenada angular medida a partir do plano virtual de propagação da trinca
σ_{yy}	tensão normal ao plano da trinca no modo I
v	velocidade
ZPD	Zona plástica deformada

RESUMO

De Assis Toti, Francisco (2004). *Tenacidade à Fratura Dinâmica de uma Liga de Alumínio de Alta Resistência SAE AMS 7475 T7351. São Carlos. 2004.* Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho teve como finalidade a determinação da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} e J_{Id} , de corpos de prova Charpy tipo-A entalhados em V e pré-trincados em fadiga, extraídos de uma placa forjada de uma liga de alumínio SAE AMS 7475 7351, nas orientações principais T-L, T-S, L-T, L-S e sua correlação com os aspectos microestruturais do material, segundo as quatro orientações. Para isso, os resultados de energia absorvida no processo de fratura dinâmica, obtidos nos ensaios de impacto instrumentado, realizados à temperatura ambiente e sob diversas taxas de carregamento dinâmico, foram aplicados nas expressões matemáticas propostas na literatura para a determinação dos valores de início da fratura dinâmica. Observou-se que os parâmetros K_{Id} , obtido por intermédio dos conceitos da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL), e J_{Id} , a partir da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, aumentam de acordo com a seqüência de orientações T-L < T-S < L-T < L-S. Esta tendência exibida pelos valores K_{Id} e J_{Id} , notadamente para a orientação L-S, foi determinada pela microestrutura do material, tal como caracterizada por exames metalográficos, que mostrou a existência de forte texturização como conseqüência do trabalho mecânico sofrido pela placa durante a sua fabricação. Os valores da tenacidade à fratura obtida para as diversas orientações

avaliadas se mostrou diretamente proporcional à área verdadeira percorrida pela trinca durante o processo de propagação através do ligamento remanescente do corpo de prova. Tentativas foram realizadas visando-se confirmar a existência de uma energia específica de fratura, por meio do cálculo da energia total por unidade de área verdadeira de fratura, com o objetivo de verificar a sua, independência com a orientação do corpo de prova ensaiado, ou seja, que fosse uma propriedade intrínseca do material. Os resultados de J_{Id} obtidos foram validados em sua grande maioria segundo critérios estabelecidos pela norma ASTM E1820 para carregamento quase-estático. Por outro lado, os resultados de K_{Id} foram reprovados, sem exceção, pelos critérios de validação estabelecidos pela mesma norma. Desta maneira, o comportamento de fratura da liga de alumínio 7475 T7351 pôde ser classificada como essencialmente dúctil, e, portanto, controlado por deformação.

Palavras-chave: Impacto Charpy Instrumentado, Liga de Alumínio de Alta Resistência, Tenacidade à Fratura Dinâmica.

ABSTRACT

De Assis Toti , Francisco (2004).. *Dynamic Fracture Toughness of High Strength Aluminium Alloy SAE AMS 7475 T7351*. São Carlos. 2004. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The main purpose of this work was to evaluate the dynamic fracture toughness properties, K_{Id} and J_{Id} , of a SAE AMS 7475 T7351 aluminium alloy forged plate under impact loading. Charpy V-notch testpieces were machined in four orientations, namely T-L, T-S, L-T and L-S, and fatigue pre-cracked. Instrumented impact tests were conducted at room temperature and under different dynamic loading rates. The results of absorbed energy during the dynamic fracture process were applied to mathematical expressions found in the literature in order to determine initiation values of crack propagation. It was observed that both K_{Id} and J_{Id} values increase according to the following sequence of orientations: T-L < T-S < L-T < L-S. Such trend was found to be ruled by the microstructure of material which shows a strong texture, as a consequence of the mechanical work imposed to the alloy. Fracture toughness values obtained for all orientations are correlated to the fracture surface area of the remaining ligament. Except for L-S testpiece orientation, which showed the strongest texture effect, the specific energy value, i.e total absorbed energy divided by the true fracture surface area, proved to be constant for all orientations. The majority of J_{Id} values are in accordance to the validity conditions imposed by ASTM E1820 for a quasi-static loading. On the other, all K_{Id} values do not satisfy the conditions imposed by the same standard. Therefore, the

fracture behavior of SAE AMS 7475 T7351 aluminium alloy can be regarded as mainly ductile, and hence deformation controlled.

Key-word: Charpy Instrumented Impact Test, High Strength Aluminium Alloy, Dynamic Fracture Toughness

1. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio de alta resistência são materiais amplamente utilizados para construção de aeronaves, sejam elas de pequeno, médio ou grande porte. Suas principais características são as elevadas relações resistência/peso e rigidez/peso (propriedades específicas), o que as tornam imbatíveis, para a construção de veículos aéreos e são condições primordiais para a eficiência de vôo. Além disto, apresentam elevada resistência à corrosão, o que torna as aeronaves relativamente pouco susceptíveis a danos de natureza corrosiva, estendendo, a sua vida útil a condições severas de vôos. Sua boa resistência aos esforços de fadiga [1], é também amplamente reconhecida. Entretanto, um requisito não menos necessário aos materiais estruturais utilizados na construção de aeronaves é a sua resistência ao impacto, em especial na existência prévia de defeitos tipo semelhante a uma trinca. Cabe ressaltar que componentes estruturais, confeccionados com ligas de alumínio, são utilizados na fabricação de trens de pouso de aeronaves, estando sujeito a cargas dinâmicas durante pousos e decolagens [2].

As trincas ou defeitos tipo-trincas eventualmente presentes nestes componentes estruturais agem como intensificadores de tensão, em que, localmente, a tensão pode atingir valores muito maior do que o limite de escoamento do material, levando a deformações plásticas

localizadas. Ocorrendo mudanças repentinas no comprimento do defeito e ou na tensão aplicada, pode ocorrer a fratura do componente. Estes eventos são classificados como fraturas dinâmicas [3]. A Mecânica da Fratura tem, no seu desenvolvimento teórico e experimental, a potencialidade necessária para prever se um determinado defeito, de uma dada dimensão, poderá propagar-se de uma maneira catastrófica sob a ação de um carregamento conhecido. Assim, é possível a determinação do grau de segurança que um componente ou estrutura opera em serviço, relativamente à ocorrência de uma falha ou fratura catastrófica. O parâmetro da mecânica da fratura que mede indiretamente a capacidade do material de resistir à fratura rápida é denominado de tenacidade à fratura dinâmica, K_{I_d} , pelos conceitos da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) ou J_{I_d} , pela Mecânica da Fratura elasto-plástica(MFEP).

2 - OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho foi o de determinar a tenacidade à fratura dinâmica, à temperatura ambiente e sob carregamento por impacto e distintas taxas de carregamento, de uma placa forjada de uma liga de alumínio SAE AMS 7475-T7351, segundo as quatro orientações T-L, T-S, L-T e L-S. Para isso, foram ensaiados corpos de prova somente entalhados em V e pré-trincados de dimensões $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$, carregados sob impacto em uma sistema automatizado e instrumentado Charpy em fundo de escala de 300J.

Objetivou-se também a correlação dos valores de tenacidade dinâmica, obtidos segundo conceitos da Mecânica da Fratura Elástica-Linear (MFEL), K_{I_d} , e da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, J_{I_d} , aos aspectos microestruturais do material exibidos nas 4 distintas orientações.

Os resultados de tenacidade à fratura dinâmica K_{I_d} e J_{I_d} foram confrontados aos critérios de validade estabelecidos originalmente pela norma ASTM-E1820 para carregamento quase-estático, visando-se constatar a sua validação, ou não, segundo, respectivamente, as abordagens da MFEL e MFEP.

Outros critérios de tenacidade, tais como capacidade máxima de carga, energias de início de crescimento e de propagação da pré-trinca existente, bem como energia total absorvida no processo de fratura, além do limite de escoamento dinâmico, dentre outros, foram avaliados à luz dos aspectos microestruturais do material, da taxa de carregamento imposta no ensaio, e comparados aos resultados obtidos em corpos de prova simplesmente entalhados carregados em idênticas condições.

Finalmente, por intermédio da mensuração da superfície verdadeira de fratura dos espécimes impactados, foram realizadas tentativas no sentido de se definir um parâmetro energético específico (energia por unidade de área) que independesse da orientação do corpo de prova avaliado, ou seja, que fosse uma constante do material.

O presente estudo pretende contribuir para um melhor entendimento do efeito da microestrutura sobre a tenacidade à fratura dinâmica de ligas de alumínio de alta resistência, bem como da mecânica e micromecanismos de propagação de trincas sob cargas de impacto. Isto se torna particularmente importante para a avaliação da integridade estrutural e a análise de falhas de componentes estruturais aeronáuticos confeccionados com esta classe de materiais (e.g. trem de pouso).

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE TENACIDADE À FRATURA

Em geral, os materiais, dependendo do campo de tensões aplicadas, podem apresentar comportamento elástico e/ou plástico. De acordo com Meguid [4], a plasticidade pode ser descrita como sendo o comportamento de corpos sólidos que se deformam permanentemente sob a ação de cargas externas. A elasticidade pode ser descrita como o comportamento reversível dos sólidos, que retorna à sua forma original imediatamente quando as cargas externas são removidas. Com isto, pode-se dizer que a tensão que separa o comportamento elástico do plástico do material é o seu limite de escoamento [5]. A figura 1 mostra esquematicamente o limite de escoamento convencional na curva tensão-deformação de engenharia de uma liga metálica.



Figura 1 - Curva tensão-deformação de engenharia [6].

A tenacidade de um dado material é uma medida da energia absorvida antes e durante o processo de fratura. Assim a tenacidade indica a quantidade de trabalho que pode ser realizado sobre o material sem causar a sua fratura. Isto pode ser quantificado através da integração da área sob o diagrama carga (tensão) vs deslocamento (deformação) exibido na figura 1. Utilizam-se as denominações “frágil” e “dúctil” para distinguir falhas ou materiais caracterizados por baixa ou alta tenacidade. Um material é classificado como tenaz (dúctil), quando absorve uma apreciável quantidade de energia antes da fratura e a curva tensão-deformação apresenta uma região com escoamento plástico generalizado, tal como verificado na figura 1. Por outro lado, um material que absorve pouca energia antes da fratura, e a curva tensão-deformação apresenta pouco ou quase nenhum escoamento plástico, é considerado pouco tenaz e fratura de maneira frágil.

A Mecânica da Fratura estende o conceito de tenacidade aos corpos sólidos elásticos lineares, não lineares e elasto-plásticos na presença de descontinuidades tipo trincas, pois estes defeitos modificam o estado de tensões locais, não só pela concentração de tensão, mas, e também, pela introdução de um estado triaxial de tensão.

3.2 – MECÂNICA DA FRATURA

A teoria da Mecânica da Fratura foi originalmente desenvolvida e proposta por volta de 1920, por Griffith Apud [7], que observou que uma trinca em um material, quando submetida a uma determinada tensão, apresentava um comportamento característico ao tipo de material e ao tamanho da trinca. Porém, a teoria de Griffith não considerava a deformação plástica sofrida pelo material. Posteriormente Irwin Apud [7,9] adicionou, à expressão de Griffith, um termo relacionado à energia de deformação plástica.

A Mecânica da Fratura assume que defeitos sempre existem em um corpo sólido, e que são suficientemente grandes se comparado com algumas dimensões características da microestrutura, como por exemplo, o tamanho de grão. Estas trincas, ou defeitos semelhantes a trincas agem como intensificadores de tensões, em que, localmente, a tensão pode ser muito maior do que a tensão de fratura do material. A figura 2 mostra as três variáveis abordadas simultaneamente na Mecânica da Fratura.

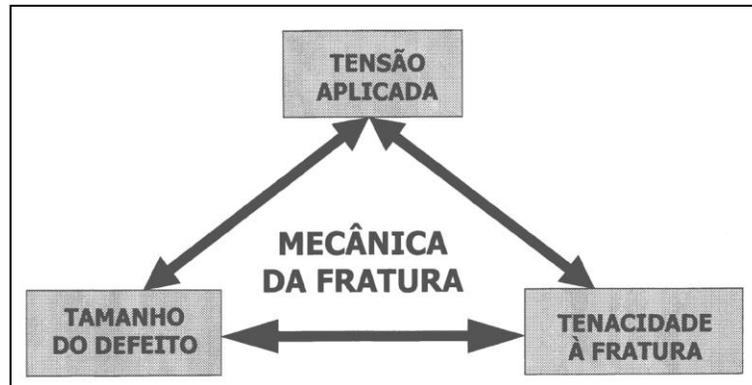


Figura 2 – Variáveis abordadas na Mecânica da Fratura [9]

O período Pós-II Guerra Mundial pode ser tomado como um marco que separou a história da Mecânica da Fratura em duas épocas distintas. Há, entretanto, uma incerteza em que período exato ocorreu esta mudança. Uma possível fase de transição gira em torno da década de 60, quando os fundamentos da Mecânica da Fratura Elástica Linear, desenvolvida a partir dos trabalhos de Griffith, baseando-se na observação de que trincas atuam como concentradores de tensão, foram razoavelmente estabelecidos, e quando os pesquisadores desenvolveram análises para validar o modelamento da região de processo da fratura desenvolvida na frente da trinca. Neste sentido, a teoria da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) limita-se ao estudo do comportamento de fratura dos materiais essencialmente frágeis, deixando de ser válida quando uma deformação plástica significativa precede uma falha, ou seja, para materiais com características dúcteis, já que a plasticidade contribui intrinsecamente para o aumento de tenacidade pelo consumo de energia. Neste caso, os conceitos mais modernos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) são necessários para a solução dos problemas.

3.3 - MECÂNICA DE FRATURA ELÁSTICA LINEAR (MFEL).

Basicamente, a Mecânica da Fratura Elástica Linear admite que a fratura de um corpo sólido ocorre a partir de um defeito pré-existente atuando como um intensificador e/ou concentrador de tensão, quando o campo de tensões elásticas na ponta da trinca atinge um determinado valor crítico. A figura 3 mostra o sistema de coordenadas cartesianas e os estados de tensão em um cubo elemento situado próximo à ponta da trinca.

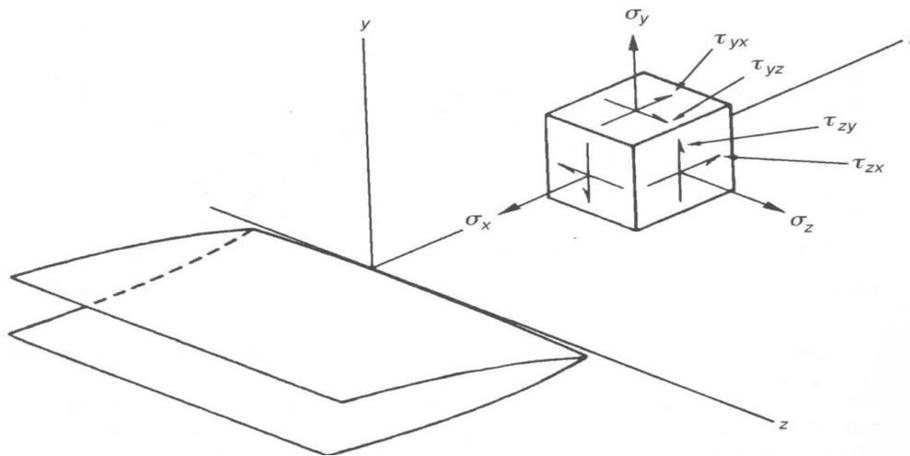


Figura 3 – Sistema de coordenadas e estado de tensões em um elemento de volume situado próximo à ponta da trinca [8].

A descrição do campo de tensões na ponta de uma trinca é efetuada levando-se em consideração três tipos básicos de carregamento, com os seguintes deslocamentos descritos abaixo e conforme ilustrado na figura 4.

Modo I – carregamento em tração, com a direção de deslocamentos das superfícies da trinca perpendicularmente a si mesmas.

Modo II – carregamento em cisalhamento (escorregamento), com a direção de deslocamentos das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas e perpendicularmente à frente de propagação.

Modo III - carregamento de cisalhamento (rasgamento), com a direção de deslocamentos das superfícies das trincas paralelamente a si mesmas e à frente de propagação.

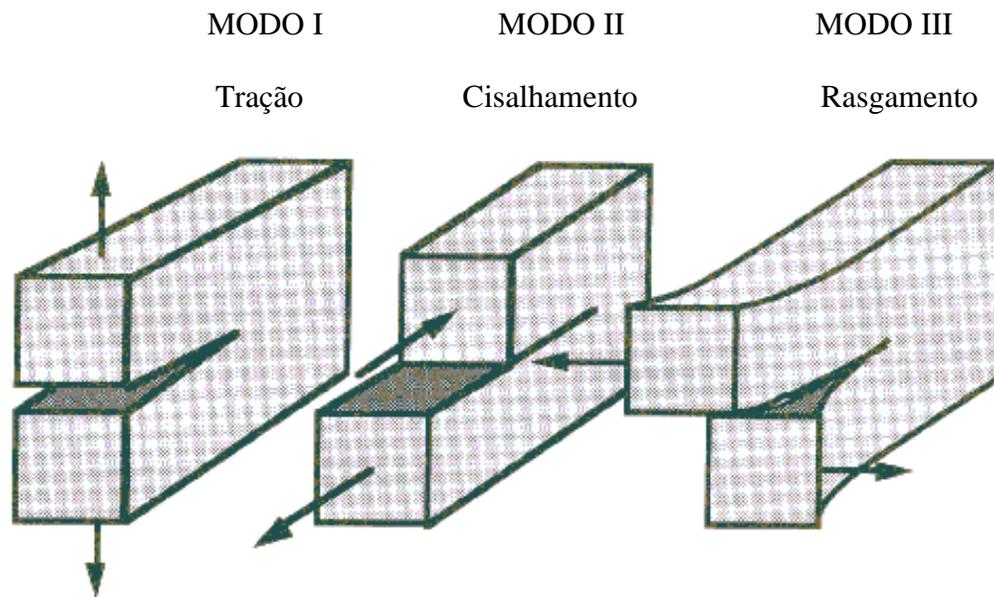


Figura 4 – Modos de carregamento para a abertura de uma trinca [9].

Na teoria, o campo de tensão que atua na frente da trinca em modo I tende a atingir valores extremamente altos à medida que se aproxima da ponta da trinca, ou seja, quando o raio da ponta da trinca tende a zero. Porém isto não ocorre na realidade, pois há um escoamento plástico do material formando uma zona deformada plasticamente na ponta da trinca. A abordagem mais simples para um comportamento elástico perfeitamente plástico é um nível

de tensão que se torne constante e igual ao limite de escoamento por todo interior da zona plasticamente deformada, ZPD. Uma abordagem mais sofisticada (comportamento elasto-plástico) assume que tensões deixam de ser constante do limite de escoamento (final da ZPD) ao limite de resistência em tração monotônica (ponta da trinca), visto o material sofrer um aumento de resistência, sendo esta devido a multiplicação de discordâncias aumentando a zona plástica.

A espessura de um componente exerce forte influência sobre o estado de tensão na ponta da trinca, podendo predominar tensão plana ou deformação plana. Em uma chapa fina, por exemplo, a tensão σ_z pode atingir valor consideravelmente baixo devido à relativa insuficiência de material ao longo de sua espessura (eixo Z). Assim:

$$\sigma_{zz} \cong 0 \quad (1)$$

Quando a espessura é suficientemente grande, σ_z pode atingir o valor correspondente à deformação plana ($\epsilon_z = 0$). Neste caso tem-se:

$$\sigma_{zz} = -\nu (\sigma_x + \sigma_y) \quad (2)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson

A consequência direta destas duas condições é o comportamento diferente de deformação do material. Deste modo componentes mais espessos onde predomina o estado de deformação plana, estão menos sujeitos ao escoamento plástico, o que leva a em menores

ductilidade e tenacidade quando comparados aos componentes mais finos, onde predomina o estado de tensões plana.

3.3.1 – FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO, K

A intensidade do campo de tensões elásticas à frente de uma trinca em um sólido frágil é definida pelo parâmetro do fator de intensidade de tensão, K que especifica de forma conveniente a distribuição das tensões elásticas ao redor do defeito. O fator K nada mais é do que a força motriz da trinca e depende diretamente do fator geométrico do componente ou corpo de prova avaliado, (Y), da tensão aplicada, (σ), e do comprimento da trinca, (a).

$$K \equiv K(Y, \sigma, a) \quad (3)$$

O valor crítico de K, para a qual a trinca se propaga instável ou catastróficamente, é definido como tenacidade à fratura. É considerado uma propriedade do material para velocidade de solitação e temperatura constante. Irwin, a partir de métodos analíticos para quantificar as tensões na frente de uma trinca em materiais elásticos Apud [9], definiu o fator de intensidade de tensão K. No modo I de carregamento, K_I , é o principal e mais utilizado na grande maioria dos ensaios descritos na literatura, pois gera resultados mais conservativos de estimativa de tenacidade à fratura dos materiais (carregamento mais

crítico). A figura 5 mostra K_I como sendo o parâmetro que descreve o campo de tensões elásticas lineares à frente de uma trinca [9].

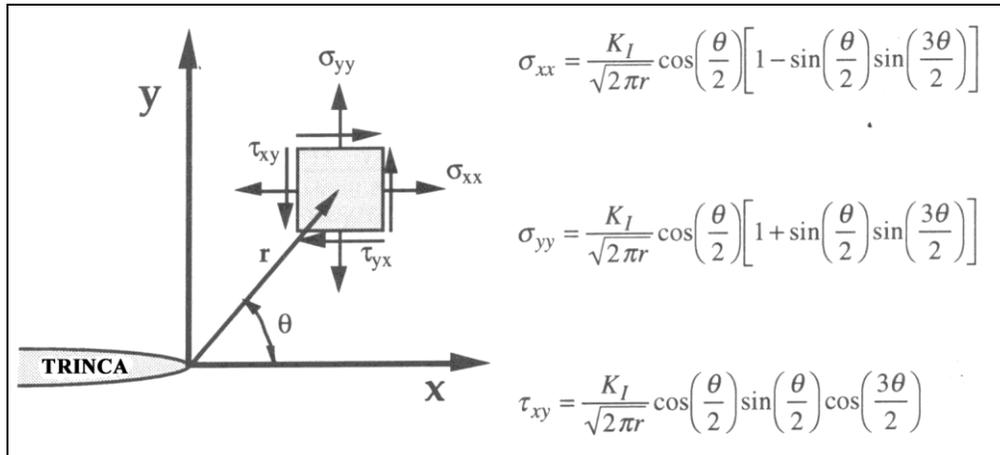


Figura 5 – Tensões próximas à frente de uma trinca em um sólido elástico [9].

Onde σ_{xx} é a tensão paralela ao plano de propagação da trinca.

σ_{yy} a tensão normal ao plano da trinca.

τ_{yx} e τ_{xy} são as tensões cisalhantes no plano xy

r a distância entre a ponta da trinca e o elemento de volume elástico avaliado.

θ o ângulo entre o plano da trinca, e o em que se encontra o elemento de volume.

Para $\theta = 0^\circ$, isto é, na análise de um elemento de volume situado exatamente sobre o plano virtual de propagação da trinca, define-se (Irwin):

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ \sqrt{2\pi r} \sigma_{yy} / \theta = 0 \right\} \quad (4)$$

Para o caso de uma chapa com dimensões infinitas, contendo uma trinca planar passante de comprimento $2a$, e carregada remotamente por uma tensão trativa uniaxial σ , perpendicular ao plano da trinca, a expressão para o fator de intensidade de tensão é:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

Uma expressão geral, para o caso de corpos de prova de dimensões finitas é:

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (6)$$

onde σ é a tensão remota aplicada e Y é chamado de fator geométrico ou de forma, e pode ser representado por uma função da flexibilidade, $f(a/W)$. Os valores de Y , para várias geometrias, podem ser encontrados na literatura [9].

A importância de K_I reside no fato de que este fator descreve completamente o estado de tensão e conseqüentemente de deformação na frente da trinca. Apesar de ter sido desenvolvido para materiais elásticos lineares, o conceito continua válido para materiais que apresentam uma zona plástica pequena e localizada na frente da trinca, ou seja, sob condição de escoamento restrito ou em pequena escala, relativamente às dimensões principais do componente ou corpo de prova analisado [9].

Ainda, com relação à figura 5, quando $\theta = 0$, a tensão cisalhante τ_{xy} é igual a zero, o que significa que o plano da trinca é um plano principal, para o modo I de carregamento. A figura 6 ilustra esquematicamente em gráfico a tensão normal, σ_{yy} , em função da distância à ponta da trinca, r . A equação (4) é somente válida perto da ponta da trinca, onde a

singularidade $\sqrt{1/r}$ domina o campo de tensão. Tensões longe da ponta da trinca são governadas pelas condições de contorno remotas. Por exemplo, se uma estrutura trincada é submetida a uma tensão de tração remota, σ_{yy} , esta tensão se aproxima de um valor constante, σ^∞ . Pode-se, assim, definir uma zona de singularidade dominante como a região onde as equações da figura 5 descrevem os campos de tensões, na proximidade da ponta da trinca.

O fator de intensidade de tensão, K , define a amplitude da singularidade da ponta da trinca. Isto é, as tensões na proximidade da ponta da trinca aumentam proporcionalmente ao valor de K . Conseqüentemente, K define completamente as condições da tensão na ponta da trinca. Assim, se o valor de K é conhecido será possível determinar todos os componentes de tensão, deformação e deslocamento em função de θ e r . Portanto, este parâmetro único descreve completamente o campo de tensão na frente da trinca e torna-se um dos mais importantes conceitos da Mecânica da Fratura Elástica Linear.

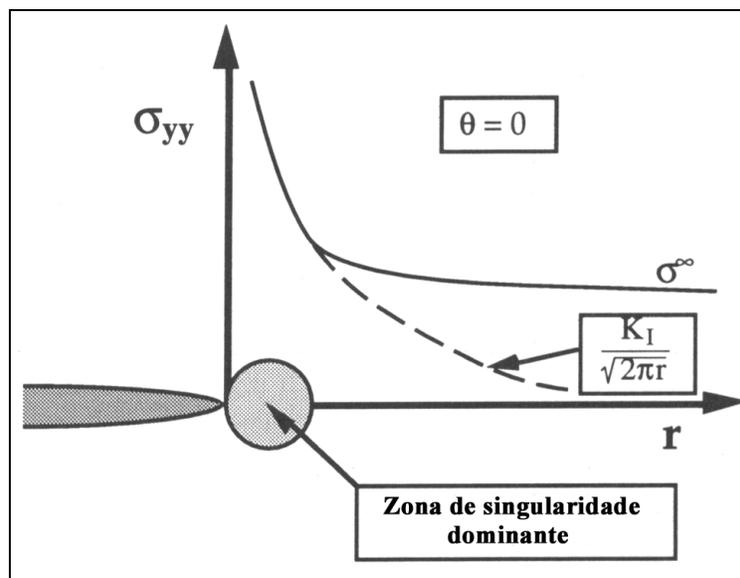


Figura 6 –Tensão normal ao plano de trinca em modo I [9].

3.4 - MECÂNICA DE FRATURA ELASTO-PLÁSTICA (MFEP)

Para níveis intermediários de tenacidade à fratura, ocorre uma transição entre a fratura frágil e a dúctil. Se a tenacidade à fratura exibida pelo material nas condições de carregamentos aplicados é relativamente baixa, a teoria da MFEL deve ser aplicada. Se for suficientemente alta, a teoria original da Mecânica da Fratura, com base na intensidade do campo de tensões elásticos K , deve ser modificada para levar em considerações os efeitos da alta plasticidade a ponta da trinca. Rice Apud [9] introduziu o conceito da integral- J , que caracteriza as relações tensão-deformação desenvolvidas num sólido elasto-plástico na presença de uma trinca. A premissa básica para o desenvolvimento da integral- J foi a de que o comportamento elasto-plástico pudesse ser aproximado pelo elástico não-linear. Pela idealização da deformação plástica da ponta da trinca como sendo elástica não-linear, Rice generalizou o conceito de taxa de liberação de energia, ou força para extensão da trinca, para materiais não-lineares. Foi demonstrado que esta taxa não linear de energia liberada pode ser expressa como uma integral de linha denominada de Integral- J , ao longo de um contorno arbitrário em torno da trinca.

A figura 7a e 7b ilustram os comportamentos elástico não linear e elasto-plástico de um corpo sólido, respectivamente.

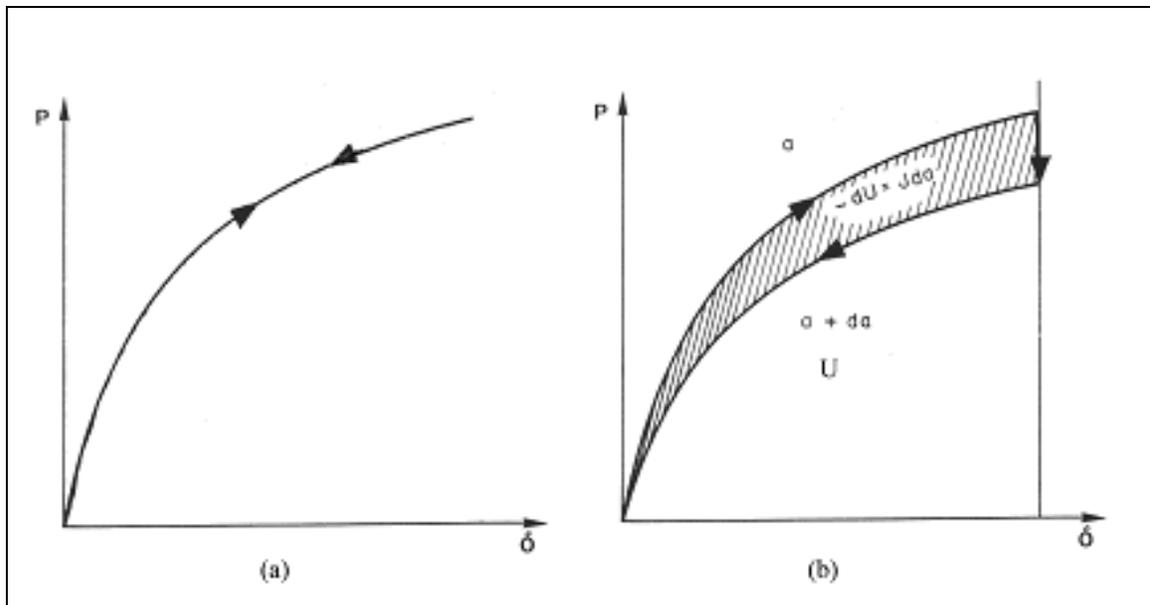


Figura 7a - Comportamento elástico não-linear de um corpo sólido. (b) A integral-J idealizada para o comportamento elasto-plástico [10]

Nestas circunstâncias, pode-se definir a integral-J para sólidos elasto-plásticos reais como a força motriz para o avanço da trinca, ou ainda como a taxa de liberação de energia para extensão da trinca.

$$J = - \frac{dU}{da} \left[\begin{array}{l} \delta \text{ ou } P \text{ constante} \end{array} \right] \quad (7)$$

Onde U é a energia elástica armazenada durante o carregamento para a abertura da trinca.

a é o comprimento da trinca.

δ é o deslocamento aplicado a um corpo elástico não-linear.

P é a carga aplicada.

3.4.1 - A OPERACIONALIZAÇÃO DA INTEGRAL – J

Nas avaliações analíticas da integral-J [9,10], aplicadas a geometrias simples, foi observada a dependência da integral-J com a carga (P) e o deslocamento na linha de carga (δ), figura 7. A expressão da integral-J para uma barra sob flexão em três pontos, figura 8, é dada por:

$$J = \frac{2}{W - a} \int_0^{\theta_c} M' \cdot d\theta_c \quad (8)$$

onde: W é a largura do cdp.

a é o comprimento da trinca.

M' é o momento fletor por unidade de espessura do corpo de prova (cdp).

θ_c é a parcela de contribuição da trinca ao ângulo total de flexão θ_t .

que leva a uma expressão relacionando J ao trabalho elasto-plástico efetuado no corpo de prova durante a extensão da trinca nele existente:

$$J = \frac{2A}{B} \quad (9)$$

Onde : A é a área total sob o diagrama carga (P) vs deslocamento na linha de carga-(δ), constituída das parcelas elásticas e plástica, como mostrado na figura 9 e b é o ligamento do corpo de prova.

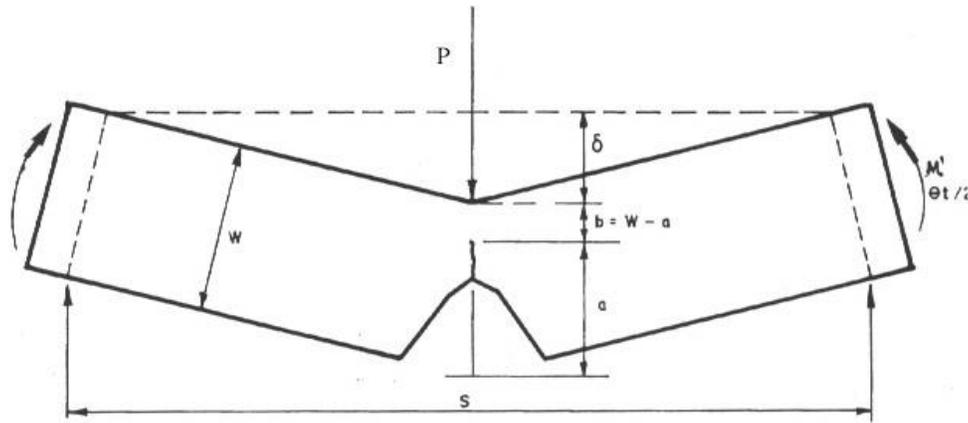


Figura 8: Esquemática experimental para a definição básica da Integral-J em barras trincadas (sob carregamento em flexão em três pontos) [10].

A caracterização da tenacidade à fratura do material constitui somente um aspecto da Mecânica da Fratura. Para a aplicação dos conceitos em projeto, deve existir uma relação matemática entre tenacidade, tensão e tamanho da trinca, tal como anteriormente esquematizado na figura 2.

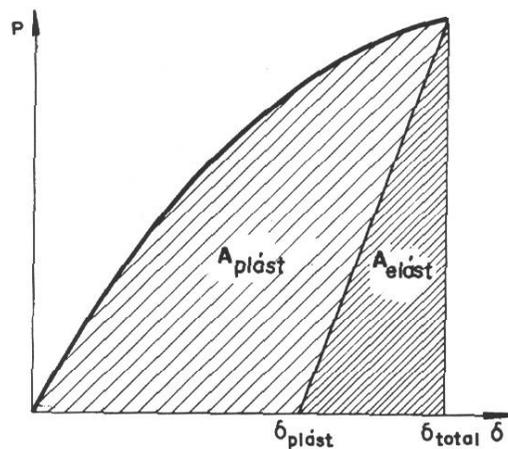


Figura 9 – A integral-J como função da área sob a curva P- δ [10].

3.5 – ENSAIO DE IMPACTO

A tenacidade de um material pode ser determinada por diferentes ensaios, sob diferentes taxas de deformação ou de carregamento. Embora a área sob a curva tensão-deformação, obtida num ensaio de tração, seja uma medida da tenacidade do material, ela é pouco utilizada para caracterizar o comportamento de fratura dos materiais. Dentre os ensaios tidos como convencionais, ou seja, excetuando-se os da Mecânica da Fratura, a tenacidade é mais comumente medida sob altas taxas de deformação, como num ensaio de impacto [11,12]. Uma vez que a medida de tenacidade mais aceita está correlacionada com a resistência que o material oferece à presença de uma trinca ou entalhe, invariavelmente os corpos de prova são entalhados ou pré-trincados antes da condução dos ensaios.

Os ensaios de impacto são denominados de ensaios dinâmicos, onde altas taxas de deformação estão envolvidas. A resposta a este tipo de solicitação é expressa por uma função transiente no tempo. As principais responsáveis pela maioria das falhas frágeis que ocorrem em serviço, são descontinuidades geométricas ou microestruturais que introduzem um estado triaxial de tensões, tal como o que existe na ponta de um entalhe, e particularmente sob temperaturas baixas. Porém, uma vez que estes efeitos são acentuados para taxas de carregamentos elevadas, vários tipos de ensaios de impacto têm sido utilizados para se determinar a suscetibilidade dos materiais à fratura frágil [6, 12]. Os ensaios Charpy e Izod são refinamentos de ensaios que foram desenvolvidos no início do século XX [13], que se diferenciam essencialmente pelas dimensões do corpo de prova e por seu posicionamento ao receberem o impacto: horizontal no primeiro e vertical no segundo. Nestes ensaios, que atualmente são considerados clássicos, um corpo de prova

entalhado é submetido ao impacto de um peso conhecido, caindo de uma altura e sob temperaturas conhecidas, em uma máquina do tipo pendular [14]. Nos sistemas mais simples, os resultados são apresentados unicamente em termos da energia total absorvida pelo corpo de prova durante o processo de fratura por impacto.

3.5.1 – LIMITAÇÕES E CAMPO DE APLICAÇÃO DO ENSAIO CHARPY CONVENCIONAL

A maior limitação do ensaio de impacto convencional é o seu resultado, que não pode ser utilizado em expressões analíticas associadas a projetos e dimensionamentos de engenharia. Isto, porque não há medidas em termos de nível de tensão desenvolvido no corpo de prova, o que dificulta, a tarefa de correlacionar a energia absorvida com o desempenho em serviço, servindo apenas para análises comparativas de materiais. No projeto mecânico, os resultados do ensaio Charpy tornam-se significativos somente quando correlacionados com um tipo particular de componente mecânico, em um tipo particular de serviço. De maneira geral, em situações sob altas concentrações de tensão e taxa de deformação elevada e baixa temperatura, o ensaio Charpy tem-se mostrado adequado para selecionar materiais. Duas tentativas de ampliar a utilidade do ensaio Charpy merecem ser citadas: o correlacionamento da tenacidade à fratura quase-estática, K_{Ic} , com a energia Charpy, CV, e a instrumentação do ensaio. Embora resultados satisfatórios tenham sido observados para alguns materiais, a aplicabilidade das correlações empíricas K_{Ic} -CV não pode ser generalizada [11,13].

3.6 – ENSAIO DE IMPACTO CHARPY INSTRUMENTADO

Desde a década de 60, vários pesquisadores têm estudado métodos e procurando técnicas para se determinar a tenacidade à fratura dinâmica a partir de ensaios de impacto [15]. Entre estes estudos e propostas, uma modificação do ensaio de impacto Charpy clássico vem recebendo grande atenção. Este novo ensaio, conhecido como ensaio de impacto Charpy instrumentado [17], surgiu como uma alternativa promissora, pois objetiva a caracterização precisa de processos dinâmicos de fratura, a despeito das inúmeras complicações relacionadas à instrumentação. Esta modificação normalmente compreende a instrumentação do martelo (célula de carga) do pêndulo Charpy, por meio de extensômetros, de modo a se obter mais informações a cerca do ensaio. A figura 10 mostra uma máquina típica para ensaio de impacto Charpy instrumentado.



(a)



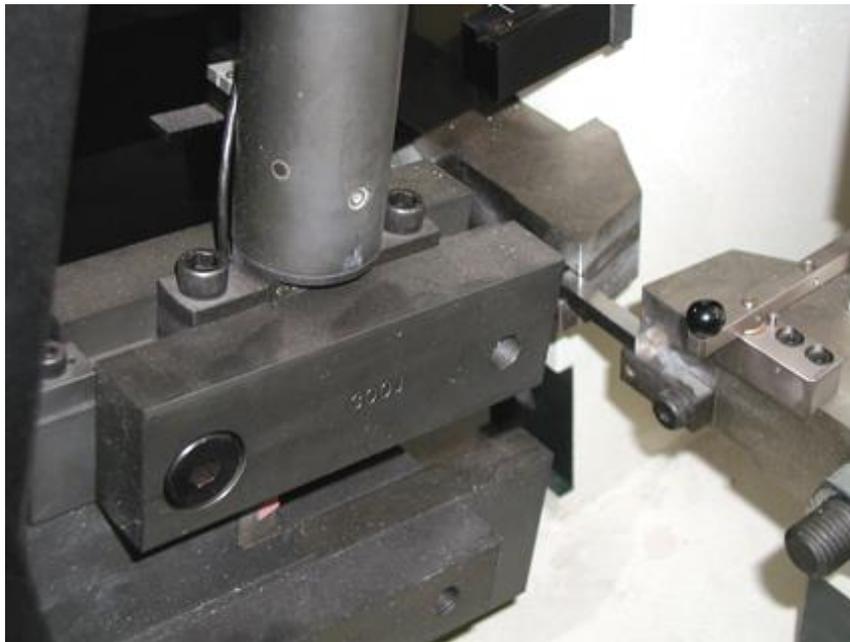
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 10 (a) Máquina de ensaio de impacto instrumentado Charpy. (b) Conjunto completo da máquina. (c) Estrutura mecânica da máquina. (d) Parte instrumentada. (e) Detalhe do martelo próximo do corpo de prova a ser submetido ao ensaio.

O ensaio consiste em se registrar, os sinais da força de impacto do martelo no corpo de prova, e plotá-los na forma de gráficos de carga vs tempo (P vs t) e carga vs deslocamento (P vs S). No sistema instrumentado e informatizado Charpy utilizado no presente estudo, o deslocamento na linha de carga do corpo de prova é monitorado. As curvas P vs t e P vs S obtidas fornecem informações sobre a carga de escoamento, P_e , carga máxima, P_m . Este ultimo parâmetro é de especial importância no cálculo da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} . É medida a carga de início da instabilidade frágil da trinca e a carga de término da instabilidade da trinca, também denominada freamento da trinca frágil, bem como os seus devidos tempos e deslocamentos de escoamento, respectivamente t_e e S_e , máximo, t_m e S_m , e total, t_t e S_t [18]. Da curva carga vs deslocamento pelo seu gráfico é possível determinar as energias relativas aos processos de nucleação e iniciação (E_i) e de propagação (E_p) da trinca assumida numa análise simples, como, respectivamente, a energia até a carga máxima e após carga máxima, que não são possíveis de serem distinguíveis no ensaio de impacto convencional. A energia total absorvida no impacto também pode ser obtida pela integração numérica da curva, como mostrada na figura 11.

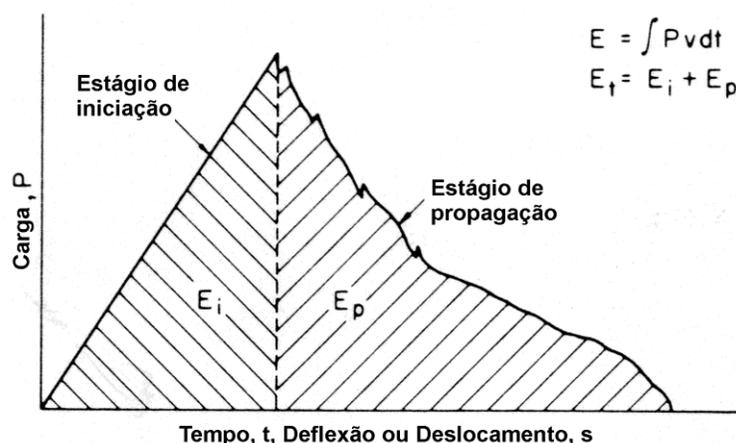


Figura 11- Curva carga vs deslocamento durante um ensaio de impacto Charpy instrumentado.

3.7 – TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA

Os valores da tenacidade à fratura dinâmica, representada pelos parâmetros K_{Id} (MFEL), ou J_{Id} (MFEP) [17,19,20,21] podem ser medidos utilizando-se corpos de provas pré-trincados. A tenacidade à fratura dinâmica pode ser definida como a resistência ao início de crescimento ou propagação de um defeito tipo-trinca pré-existente na estrutura ou de um corpo de prova submetido à carga de impacto. O ensaio de impacto Charpy instrumentado é utilizado nos dias atuais para se avaliar a tenacidade à fratura dinâmica, devido à sua relativa simplicidade [22].

3.7.1 - MÉTODOS PARA A ESTIMATIVA DOS VALORES DE TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA

Angamuthu et alli [22] desenvolveram dois métodos básicos para a estimativa dos valores da tenacidade à fratura dinâmica, respectivamente para materiais exibindo comportamentos intrinsecamente dúctil (J_{Id}) e essencialmente frágil (K_{Id}).

No 1º método, quando o início da trinca ocorre antes do ponto de carga máxima, no escoamento generalizado do espécime, segundo Kobayashi [19,21,23], a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, (MFEP) é utilizada para avaliar o valor de J_{Id} , observando-se invariavelmente a ocorrência de uma fratura dúctil.

No 2º método, quando o início da trinca ocorre no pico de carga máxima, ou seja, na instabilidade, sem que se observe o escoamento generalizado, a Mecânica da Fratura Linear Elástica, (MFEL) é empregada para se estimar o valor de K_{Ic} , quando uma fratura frágil é geralmente desenvolvida.

As curvas P vs S e P vs t geradas no ensaio Charpy instrumentado, geralmente apresentam oscilações, resultantes da inércia do cdp, \neq massa cdp/martelo e são observáveis em materiais que exibem níveis baixo e intermediário de tenacidade relativamente à capacidade de impacto do martelo. Essas oscilações são eliminadas ou minimizadas utilizando-se o método da média móvel [21,22].

3.8 – TIPOS DE FRATURA

O termo fratura dúctil pode se referir ao modo de fratura, ou a um colapso por deformação plástica seguida de ruptura do material. A fratura frágil pode ser entendida como uma propagação rápida de uma trinca instável ou como clivagem. O significado destes termos deve ser bem esclarecido, pois há casos em que as condições de um ensaio não reproduzem fielmente o comportamento da estrutura (por exemplo, devido a efeitos de escala), e os resultados de laboratório devem ser interpretados com cautela.

3.8.1 – FRATURA DÚCTIL

Geralmente é o modo escolhido por metais puros, que exibem deformações plásticas da ordem de 100% antes da fratura. A fratura dúctil consome muita energia devido ao grande trabalho de deformação que envolve. Além disto, a trinca não se propaga de maneira rápida, e a falha da estrutura ou componente é precedida por extensa componente de deformação plástica. No campo de tensão gerada durante o processo de fratura os componentes de cisalhamento predominam.

3.8.2 – FRATURA FRÁGIL

Muitos metais e ligas fraturam de maneira frágil, não apresentando deformação plástica macroscópica. Porém, a fratura é sempre iniciada e acompanhada por deformação plástica localizada, e duas características deste tipo de fratura são preocupantes:

- 1- ocorre sob tensões inferiores ao escoamento generalizado.
- 2- ocorre de maneira súbita ou catastrófica

A fratura por clivagem ocorre devido a fatores que intensificam as tensões trativas durante o processo de propagação da trinca, tais como a existência de um campo de tensão triaxial na ponta do entalhe ou da trinca, altas taxas de carregamento e baixas temperaturas.

3.9 – EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA ELASTO-PLÁSTICA, J_{Id} .

Para materiais que apresentam um comportamento mecânico intrinsecamente dúctil, os valores de J_{Id} são calculados pela equação de Rice (10) derivada no estágio inicial da integral-J:

$$J_{Id} = \frac{2E}{B(W - a)} \quad (10)$$

onde:

E é termo de energia absorvida na propagação da trinca

B é a espessura do corpo de prova

W é a largura do corpo de prova

a é o comprimento da pré-trinca

$W - a = b$, b é o ligamento do corpo de prova

Para materiais dúcteis, o ponto de início de propagação da trinca pode ser simplesmente assumido como sendo o de carga máxima (P_m), ou então, de modo mais complexo e preciso, ser detectado pelo método da taxa de variação da flexibilidade elástica. Esse método é basicamente definido pela equação (11) [22, 23,24].

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C - C_{el}}{C_{el}} \quad (11)$$

onde

$\Delta C / C$ = taxa de mudança da flexibilidade elástica do corpo de prova

C = secante da flexibilidade

C_{el} = flexibilidade elástica

Este método consiste em se registrar a deformação e a súbita mudança do ponto do gradiente da flexibilidade, tal como ilustrado na figura 12, indicando o ponto exato onde ocorre o início da propagação da trinca [21,22,24]. O princípio de funcionamento do método da flexibilidade é estabelecido com base nas seguintes etapas de deformação do corpo de prova:

- 1- Estágio de deformação elástica, desde que a flexibilidade elástica seja considerada constante, $\Delta C / C = 0$.
- 2- Estágio de deformação plástica, $\Delta C / C$ apresenta o aumento da constante (flexibilidade), e o aumento de $\Delta C / C$ é dependente do expoente de encruamento do material.
- 3- Quando a trinca inicia, há um aumento de $\Delta C / C$ e observa-se uma diminuição da área resistente do corpo de prova.

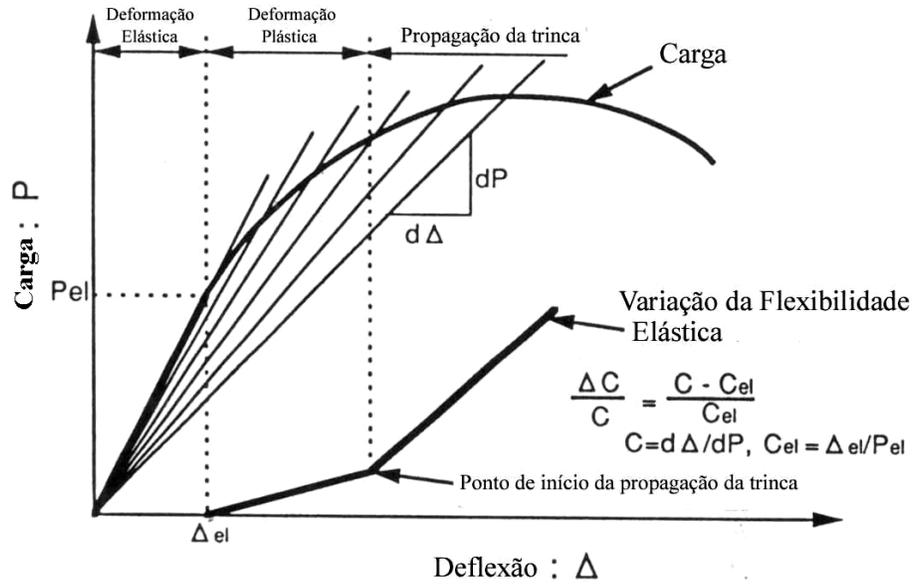


Figura 12 – Método da taxa de variação da flexibilidade elástica [23].

Um programa computacional, utilizando as ferramentas do programa Matlab, foi especialmente desenvolvido para o cálculo do ponto exato do início de propagação de trinca dúctil, e é descrito em materiais e métodos no item 4.7, determinado a expressão matemática final seguinte para a determinação de J_{Id} :

$$J_{Id} = \frac{2E_i}{B(W - a)} \quad (12)$$

onde E_i é a energia absorvida até o início de propagação da trinca

3.10– EXPRESSÕES MATEMÁTICAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA ELÁSTICA LINEAR, K_{Id} .

Para materiais exibindo um comportamento mecânico essencialmente frágil, quando o início do crescimento da trinca ocorre próximo ao ponto de carga máxima sem a curva P vs S apresentar um escoamento generalizado, o parâmetro K_{Id} [23,24], é obtido por :

$$K_{Id} = \frac{6YM(a)^{0,5}}{BW^2} \quad (13)$$

$$Y = 1,93 - 3,07(a/W) + 14,53(a/W)^2 - 25,11(a/W)^3 + 25,8(a/W)^4 \quad (14)$$

M é o momento de fletor aplicado $\equiv P_m S / 4$

S é a distância entre os apoios

Para corpos de prova do tipo flexão em 3 pontos em padrão Charpy do tipo A, pré-trincados a uma razão de $a/W = 0,2$, o valor de K_{Id} pode ser estimado pela equação (15) [25].

$$K_{Id} = 4,67 P_m \quad (15)$$

Onde : P_m é o valor da carga máxima em kN.

3.11 – DERIVAÇÃO DE J_{Id} A PARTIR DE K_{Id}

Sob condições especiais, ou seja, no regime de transição MFEL \leftrightarrow MFEP a seguinte relação pode ser aplicada [21,22, 23, 26]:

$$J_{Id} = \frac{K_{Id}^2}{E} \quad (16)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material.

Para se checar a validade dos resultados de tenacidade à fratura elasto-plástica, J_{Id} , são aplicadas as expressões (17) e (18) proposta por [22,26], que se baseiam nas diretrizes estabelecidas pela norma E1820 [27].

$$a, B, W, b \geq 25 (J_{Id} / \sigma_{yd}) \quad (17)$$

$$\sigma_{yd} = 2,85 P_y W / (Bb^2) \quad (18)$$

Para checar a validade dos resultados de tenacidade à fratura elasto-linear, K_{Id} , são aplicadas as expressões (18) e (19), que se baseiam nas diretrizes estabelecidas pela norma E399 [30].

$$W, b, B, a \geq 2,5 (K_{Id} / \sigma_{yd})^2 \quad (19)$$

onde σ_{yd} é o limite de escoamento dinâmico

b é o comprimento do ligamento do corpo de prova, $W-a$.

4– MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – MATERIAL

O material investigado neste estudo foi uma liga de alumínio de alta resistência SAE AMS 7475, tratada para a condição T7351 [28], realizado em quatro etapas de tratamentos, descritas abaixo:

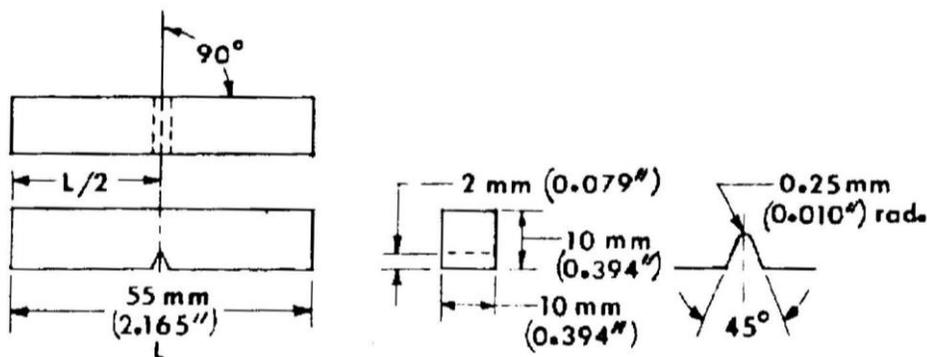
- 1) Solubilização da liga entre 460° C e 500° C e logo após resfriá-la em água à 40° C.
- 2) Estiramento controlado a frio, com 1,5% a 3% de deformação.
- 3) Alívio de tensões, entre 100° C e 135° C, por um tempo entre 12h.
- 4) Envelhecimento artificial entre 155° C 175° C por um tempo entre 15h, a uma taxa de aquecimento menor que 20° C/h.

É uma liga amplamente empregada em aplicações estruturais na indústria aeronáutica, apresentando características de alto limite de resistência, boa resistência à corrosão sob tensão, moderada resistência à fadiga e relativamente alta tenacidade à fratura. O material foi fornecido na forma de placa forjada com dimensões de 60x300x300mm³ pela empresa EMBRAER.

4.2- CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CHARPY.

Os corpos de prova Charpy do tipo A, figuras 13 a e 13 b foram extraídos segundo as 4 orientações T-L, T-S, L-T e L-S, conforme esquema mostrado na figura 14.

Os corpos de prova entalhados em V foram fabricados com ferramenta de corte conforme mostrado na figura 13 a, enquanto que os pré-trincados foram eletro-erodidos com filamento de diâmetro de 0,2 mm, para produção de um entalhe de 1mm de profundidade, seguido de uma pré-trinca por fadiga, como ilustrado na figura 13 b. As pré-trincas por fadiga foram introduzidas por meio de um sistema de ensaio servo-hidráulico MTS 810 até uma relação a/W de aproximadamente 0,2, onde a é o comprimento da trinca e W a altura do corpo de prova. As condições de pré-trincamento foram: razão de carga $R = 0,1$, fator de intensidade de tensões elásticas máximo (K_{max}) de $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, e frequência de aplicação da onda senoidal de 30Hz.



(a)

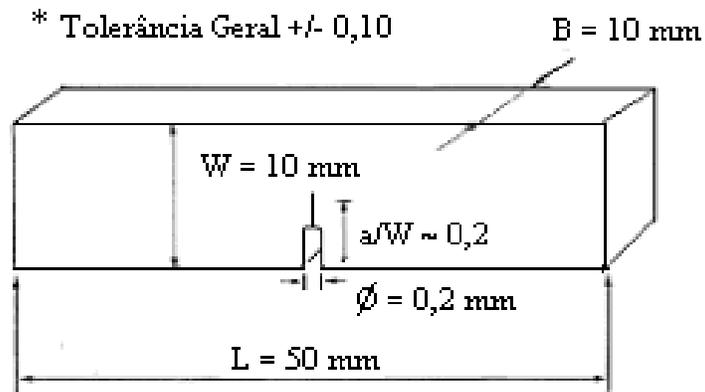


Figura 13 - (a) Detalhes do corpo de prova entalhado. (b) com pré-trincamento utilizado no ensaio de impacto Charpy, conforme a norma ASTM E23 [12].

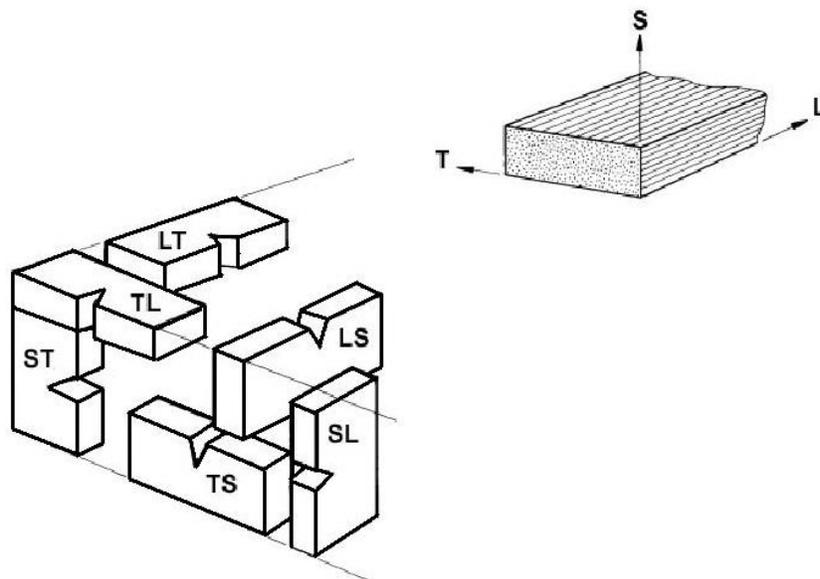


Figura 14 – Direções principais da placa forjada, mostrando as orientações dos corpos de prova segundo as orientações de carregamento e propagação de trinca [30].

4.3 - – ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As amostras metalográficas com orientações L-T, L-S e T-S foram polidas mecanicamente e atacadas com o reagente de Keller. Foram observadas e fotografadas utilizando-se um microscópio óptico Leica modelo Leitz DMRX, com o objetivo de examinar-ser as características microestruturais, níveis de segunda fases e a presença de textura, existentes nas três direções principais da placa forjada.

4.4 -ANÁLISE QUANTITATIVA DE SEGUNDAS FASES

As amostras metalográficas com orientações L-T, L-S e T-S foram polidas mecanicamente e observadas e sem ataque. Foram observadas pelo método proposto pela norma ASTM E1245 que consiste determinar a porcentagem de inclusões e intermetálicos bem como sua distribuição. Para a análise automática de imagem, adotou-se a cor vermelha para as inclusões e a cor azul para os intermetálicos [31]. As microestruturas foram fotografadas utilizando-se um microscópio óptico Leica modelo Leitz DMRX, conforme mostrado na figura 15, de modo a calcular a média quantitativa de segundas fases (inclusões + precipitados) pela escolha aleatória de cinco áreas para cada orientação, com o objetivo de correlacionar o processo de fabricação com a tenacidade à fratura dinâmica.

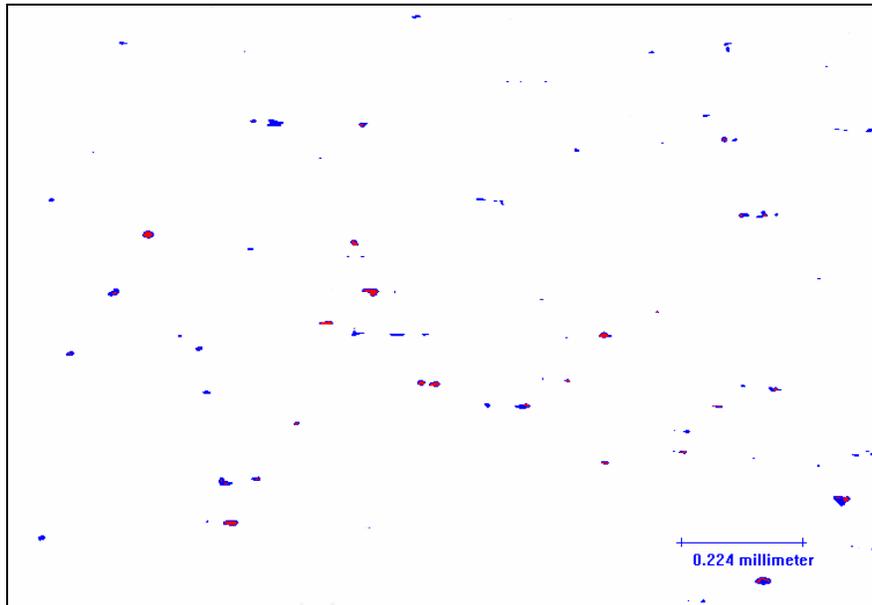


Figura 15 – Amostra do plano metalográfico S-L apresentando inclusões e intermetálicos. Aumento 100X.

4.5 – ANÁLISE QUÍMICA

A composição química da liga foi determinada pela técnica espectrometria de emissão óptica, com o objetivo de obter a % em peso dos elementos químico, para uma posterior comparação com as especificações técnicas estabelecidas na norma SAE AMS 2355, referente a liga de alumínio 7475 T7351. Os limites mínimos e máximos permitidos de cada elemento são fornecidos na Tabela I.

Tabela I – Limites mínimo e máximo de composição química da liga de alumínio 7475 T7351 segundo a norma SAE AMS 2355.

Elemento Químico	% Peso Normalizado	
	Mínimo	Máximo
Si	-----	0,10
Fe	-----	0,12
Cu	1,2	1,9
Mn	-----	0,06
Mg	1,9	2,6
Cr	0,18	0,25
Ni	-----	0,05
Zn	5,2	6,2
Ti	-----	0,06
Ca	-----	-----
P	-----	0,05
Pb	-----	0,05
Sb	-----	0,05
Sn	-----	0,05
Sr	-----	-----
V	-----	0,05
Zr	-----	0,05
B	-----	0,05
Cd	-----	-----
Co	-----	0,05
Al		balanço

4.6- ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY INSTRUMENTADO

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados à temperatura ambiente, em um sistema de ensaio PW30 instrumentado e informatizado de impacto Instron Wolpert, do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística - EESC-USP. Esse sistema fornece curvas carga-tempo, carga-deslocamento, energia de impacto-deslocamento,

deslocamento-tempo e velocidade-tempo. Fornece também os valores de força, deslocamento, tempo e energia nos eventos de escoamento global, na carga máxima, no início de freamento de trinca frágil ou instável, conforme ilustrado na figura 16. As velocidades iniciais utilizadas para o impacto de martelo foram de 5,52 m/s para o fundo de escala de 300 J, de 4,0 m/s para 158 J, 3,20 m/s para 100 J e 2,25 m/s para 50 J.

Foram ensaiados um corpo de prova entalhado e três corpos de prova pré-trincados para as orientações T-L, T-S, L-T e L-S na velocidade de carregamento de 5,52 m/s, no qual foi utilizado a média dos valores obtidos. Na velocidade de carregamento de 4,0 e 3,2 m/s um corpo de prova pré-trincado para a orientação L-S. Para a velocidade de carregamento 2,25 m/s, foram ensaiado um corpo de prova pré-trincado para cada para a orientação T-L, T-S, L-T e L-S. A orientação L-S não pode ser ensaiada à velocidade de 2,25 m/s devido ao fato de que a essa velocidade não ocorreu a ruptura do cdp, em função da baixa energia disponível no impacto.

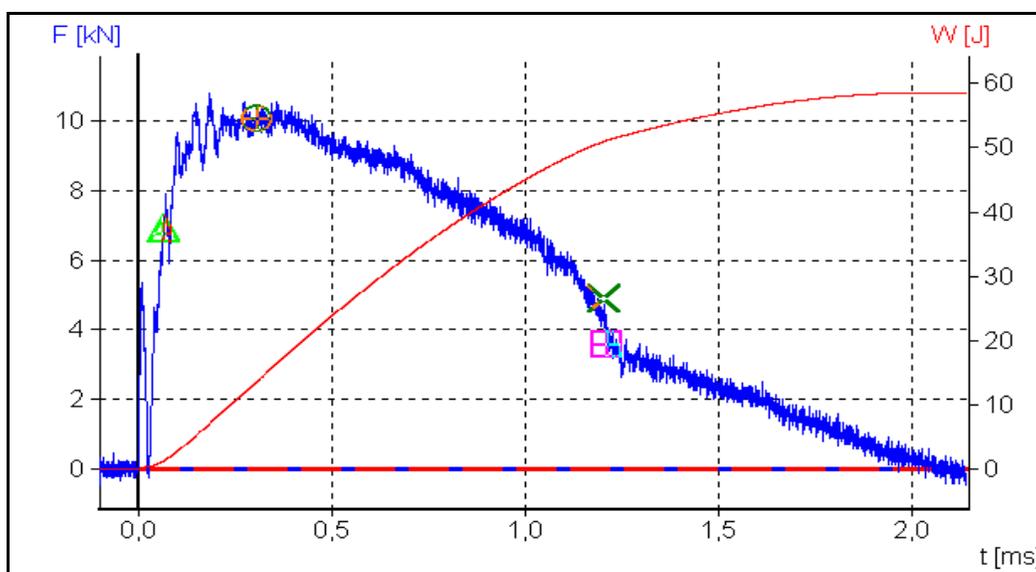


Figura 16 – Curva da carga-tempo-energia registrada durante o ensaio de impacto instrumentado Charpy.

Onde:

- Δ é o ponto de carga de escoamento global
- \oplus é o ponto de carga máxima
- X é o ponto de início de propagação instável da trinca
- é o ponto de término ou freamento da propagação instável da trinca

4.7 - PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A DETERMINAÇÃO DO INÍCIO DO CRESCIMENTO DÚCTIL SEGUNDO O MÉTODO DA TAXA DE VARIAÇÃO DA FLEXIBILIDADE ELÁSTICA.

Um programa computacional foi desenvolvido para materiais com característica frágeis e dúcteis. Foi baseado nos dois métodos propostos por Angamuthu (vide ítem 3.7.1) utilizado o programa Matlab como base e aplicado no cálculo da média móvel para a filtragem das oscilações dos sinais de carga, registrados da curva carga-deslocamento. É difícil distinguir a origem destas oscilações, pois a maioria das referências nesta área de estudo associa este comportamento dos sinais a oscilações inerciais. Em todo caso, essas oscilações podem conter várias combinações, tais como efeitos do processo de deformação, avanço da trinca ou mesmo originado pelo impacto das partes envolvidas [15].

O programa indica as opções para as seqüências denominadas de frágil e dúctil. Na seqüência frágil é apresentado no término do polimento o gráfico da curva, indicando o ponto de carga máxima, cujo valor é utilizado para o cálculo de K_{Id} , pelos princípios da Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL)

Na seqüência dúctil, após o término do polimento da curva, o programa pede para determinar a flexibilidade e imediatamente fornece os valores de carga máxima, de início

de propagação da trinca e de escoamento, e os valores de energia que são utilizados para o cálculo de J_{Id} pelos conceitos da Mecânica da Fratura Elasto Plástica (MFEP). A determinação de qual seqüência seja ela dúctil ou frágil, para o polimento da curva, fica a critério do operador. As figuras 17 e 18 mostram as curvas carga-deslocamento segundo a orientação T-S, analisada no presente estudo para fins comparativos, pelo critério frágil e dúctil, respectivamente. A figura 19 apresenta a curva carga-deslocamento segundo a orientação L-S, analisada pelo critério dúctil.

As etapas para a execução do programa são descritas abaixo:

- 1- os pontos de carga-deslocamento registrados pelo programa Instron em forma de planilha Excell foram transformados para a forma de arquivo TXT.
- 2- O arquivo TXT foi inserido no programa Matlab, que gerou a primeira janela, pedindo que fosse inserido o tipo do material correspondente para o arquivo.
- 3- O programa abre a segunda janela para determinar se o material tem característica dúctil (J_{Id}) ou frágil (K_{Id}). Em seguida abre a terceira janela para que seja estipulado o número de filtrações mínimas dos sinais para o polimento da curva.
- 4- Após o término das filtrações mínimas estipuladas, abre-se a quarta janela avisando se há necessidade de mais filtrações.
- 5- Após o término da filtração, o programa pede que sejam marcados dois pontos na região onde se apresenta uma reta. Em seguida o programa amplia a região não retilínea escolhida anteriormente, para que sejam marcados quatro pontos, os dois primeiros próximos (denominado reta 1) e os dois últimos (denominados reta 2), logo após o desvio apresentado pela reta.
- 6- Em seguida, o programa apresenta as curvas de carga-deslocamento comparando o sinal real com o filtrado da rigidez elástica, tratada matematicamente e apresentando

o ponto de carga de escoamento, de carga de flexibilidade e de carga máxima, e a taxa de variação da flexibilidade..

- 7- Por último, o programa apresenta os valores de J_{Id} e K_{Id} utilizando as expressões 12,15 e 16.

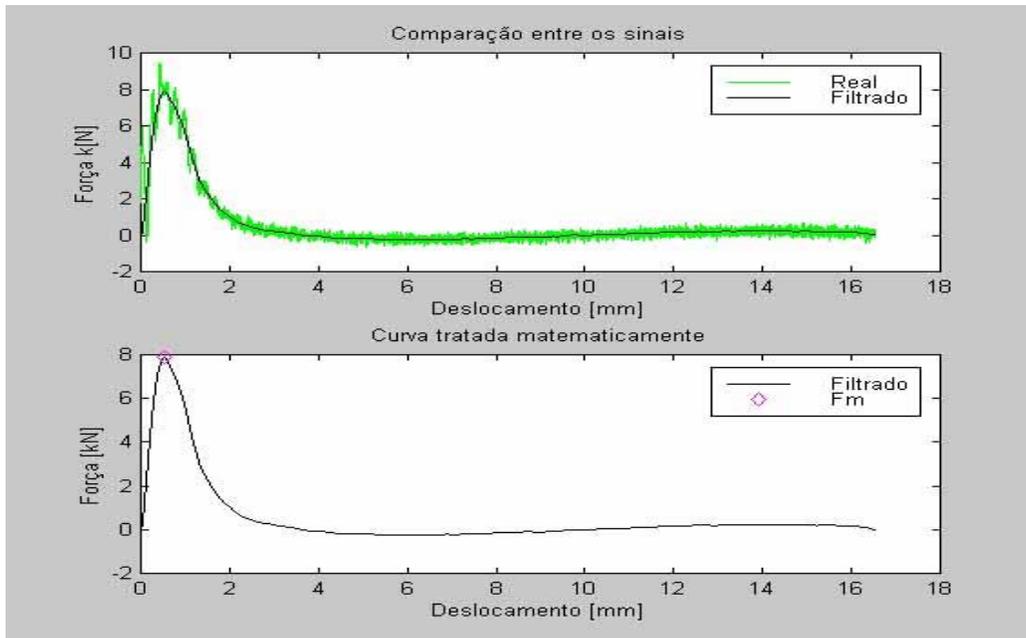


Figura 17 – Curva de carga-deslocamento segundo a orientação T-S apresentando característica frágil após a aplicação do programa computacional pelo critério frágil, indicando o ponto de força máxima, F_m .

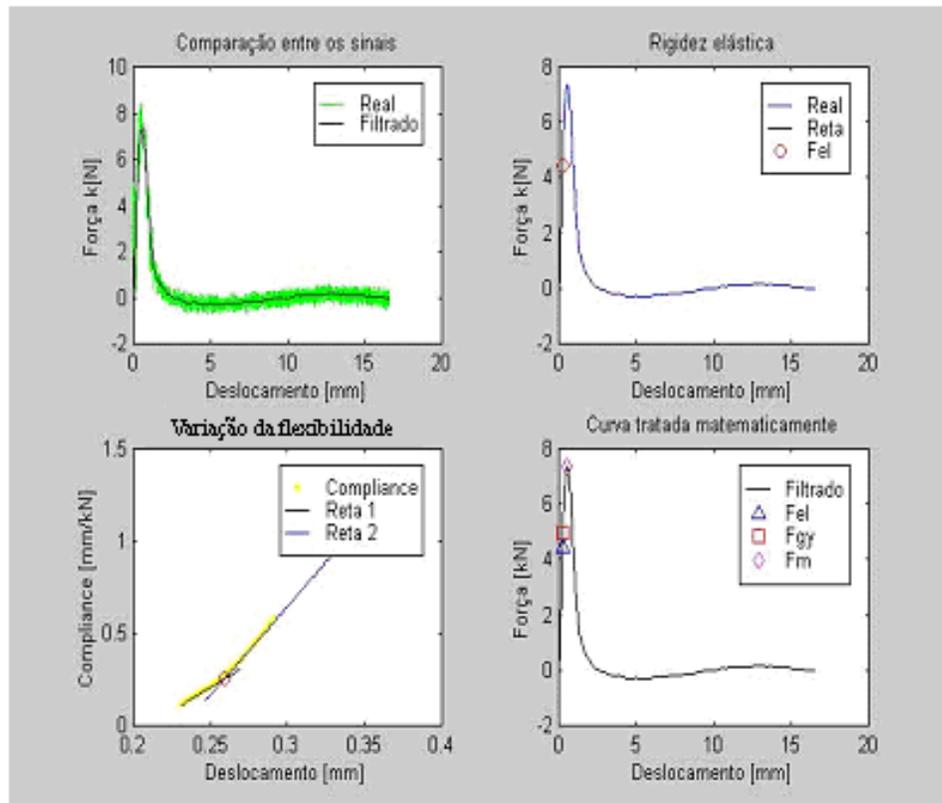


Figura 18 – Curva de carga-deslocamento segundo a orientação T-S apresentando característica frágil após a aplicação do programa computacional pelo critério dúctil. São indicados os pontos de força elástica, F_{el} , de início de propagação da trinca, F_{gy} e máxima, F_m .

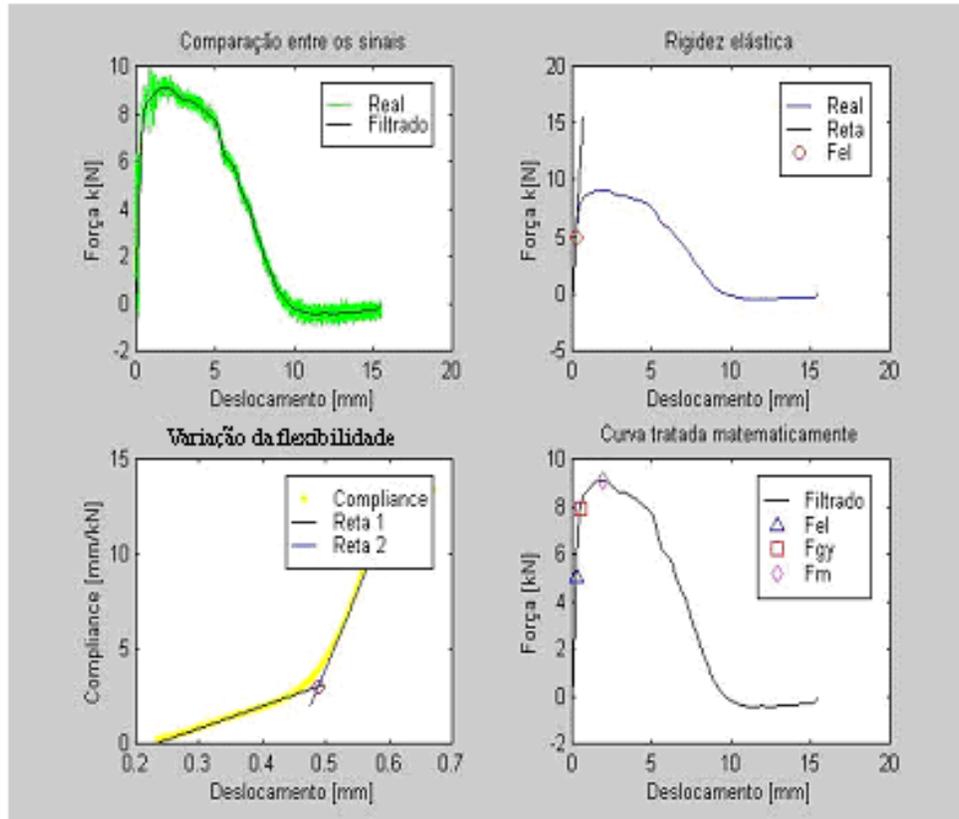


Figura 19 – Curva de carga-deslocamento segundo a orientação L-S apresentando característica dúctil após a aplicação do programa computacional pelo critério dúctil. São indicados os pontos de força elástica, F_{el} , de início de propagação da trinca, F_{gy} e máxima, F_m .

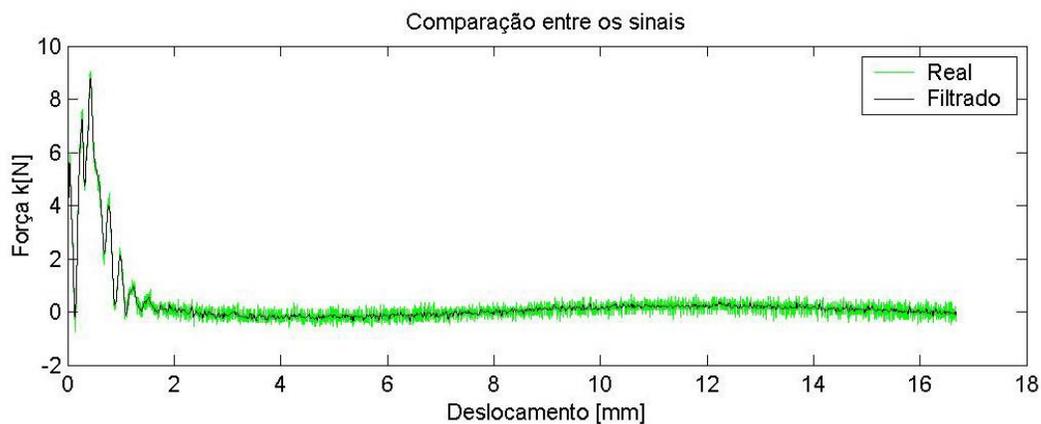
4.7.1 - APLICAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL DE DETERMINAÇÃO DO PONTO DE INÍCIO DE CRESCIMENTO DÚCTIL DE TRINCA.

A aplicação deste programa tem como objetivo a determinação dos valores da carga e energia de início de propagação da trinca. Para a análise das curvas carga-deslocamento nas orientações T-L, T-S, L-T e L-S pelo programa computacional, todas as orientações foram analisadas tanto pelo critério frágil como pelo dúctil, segundo os procedimentos descritos

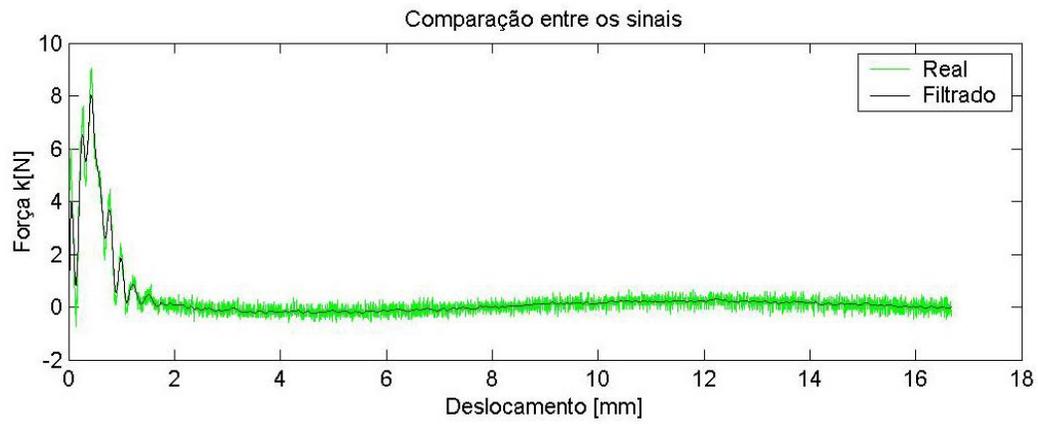
no ítem 4.7. Visto que o programa na sua versão dúctil ou elasto-plástica detectou o início de crescimento dúctil de trinca ocorrendo entre os pontos de escoamento generalizado e de carga máxima, optou-se pelo critério dúctil, posto que o programa, na sua versão de fratura frágil ou elástica-linear, fornece somente o valor de carga máxima.

Quanto ao número mínimo de filtragens para o adequado polimento da curva, após alguns testes e análise visual, estipulou-se um total de 21, para evitar um número maior de filtragens, o que poderia levar a um distanciamento da trajetória original da curva.

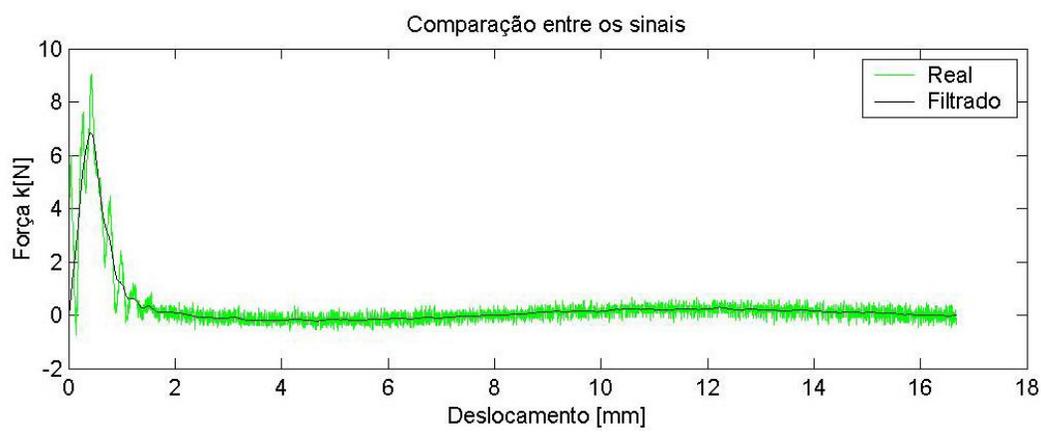
As figuras 20 e 21 apresentam os resultados das curvas carga-deslocamento para dois corpos de prova na orientação T-L (frágil) e L-S (dúctil), respectivamente e após o número de 5, 11, 21, 31 e 51 filtragens. Observa-se que conforme se aumenta o número de filtragens, o valor de carga máxima vai decrescendo na curva carga-deslocamento da orientação T-L, que apresentou característica frágil. O mesmo não ocorreu com a orientação L-S, que apresentou característica dúctil.



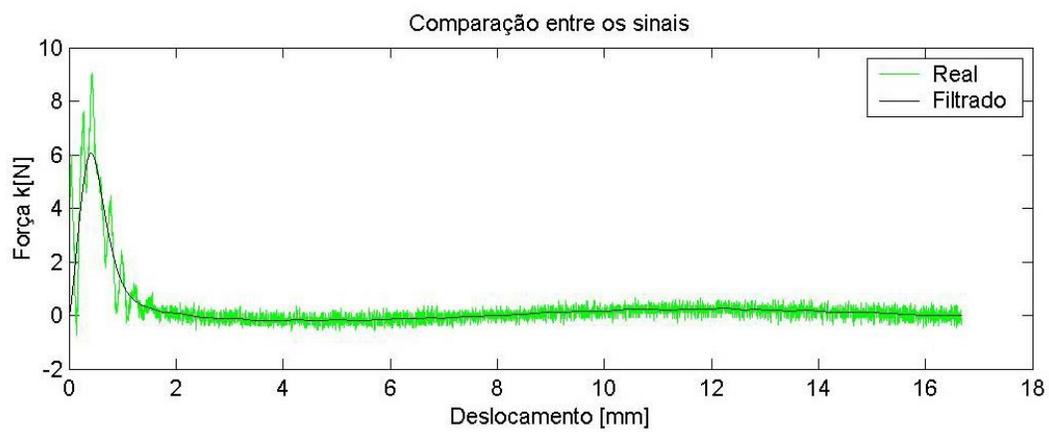
(a)



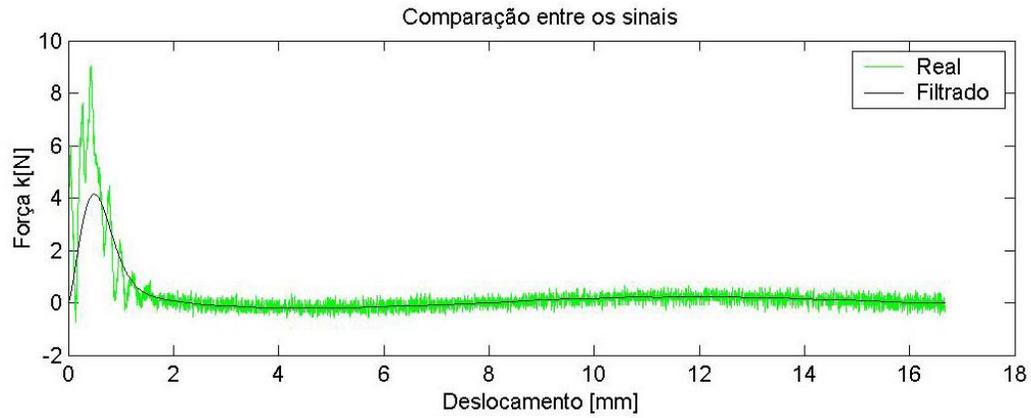
(b)



(c)

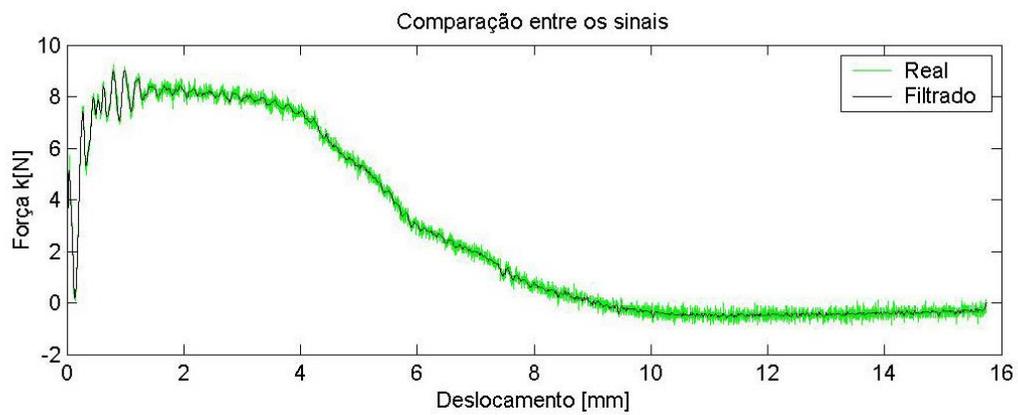


(d)

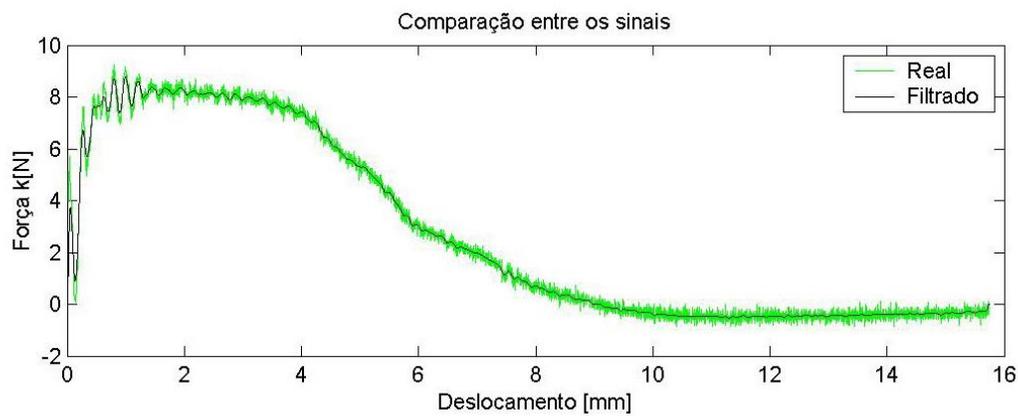


(e)

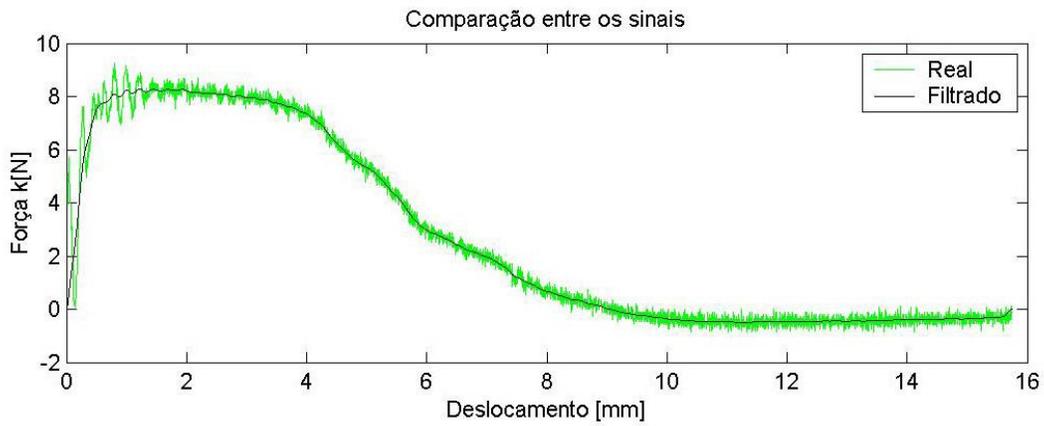
Figura 20 – Curva de carga-deslocamento na orientação T-L após (a) 5 , (b) 11, (c) 21, (d) 31 e (e) 51 filtragens registradas pelo programa computacional para o polimento das curvas.



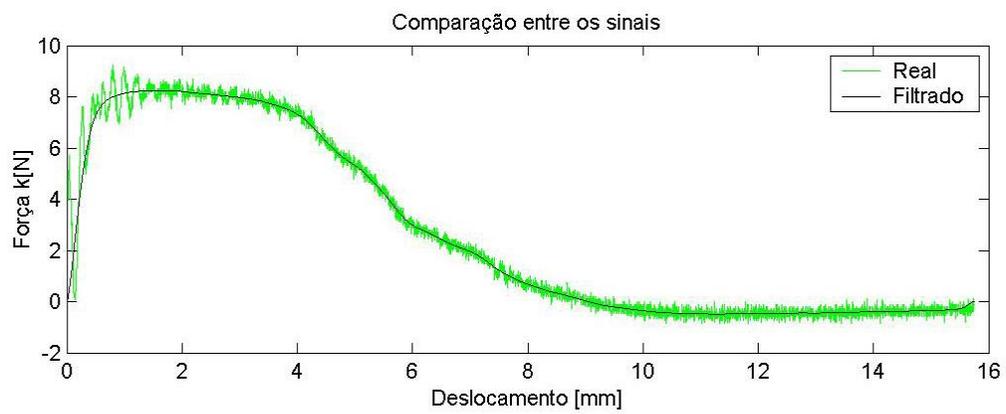
(a)



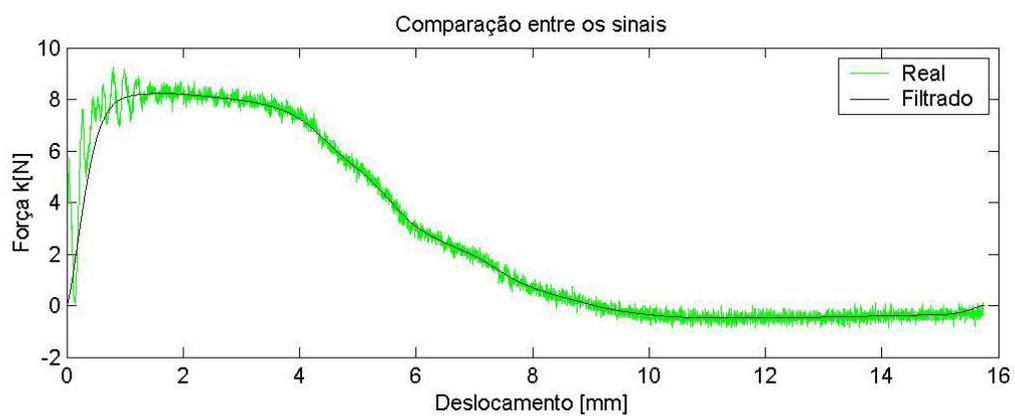
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 21 – Curva de carga-deslocamento na orientação L-S após (a) 5, (b) 11, (c) 21, (d) 31 e (e) 51 filtragens registradas pelo programa computacional para polimento das curvas.

Os critérios dos coeficientes de ajuste admissíveis da reta na região linear, da reta na região de deformação plástica e da reta na região de propagação da trinca que o programa apresenta no final, ficou determinado no valor mínimo de 0,999, para se normalizar os resultados obtidos. Este valor mínimo foi decidido após uma certa experiência adquirida com o programa, com a utilização de uma diversidade de materiais ensaiados incluindo, além da liga de alumínio 7475 T7351, soldas metálicas, aços de grau nuclear, bem como materiais compostos carbono-epoxi.

4.8 – ANÁLISE DO PERFIL DA FRATURA DOS CORPOS DE PROVA FRATURADOS POR IMPACTO

A análise dos perfis de fraturas dos cdps Charpy foi realizada por meio do seccionamento longitudinal dos cdps, em 3 posições distintas (superfície do espécime, $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{2}$ da espessura) e observação em um microscópio óptico Leica modelo Leitz DMRX. Em seguida, estes perfis foram fotografados e montados, com o objetivo de se determinar a área verdadeira da fratura e comparar com a área convencional ($W - b$) e correlacionar com a energia absorvida no processo de fratura dos corpos de prova nas quatro orientações. Um exemplo da montagem realizada com fotos tiradas no microscópio óptico referentes a um perfil de fratura está ilustrado na figura 21.

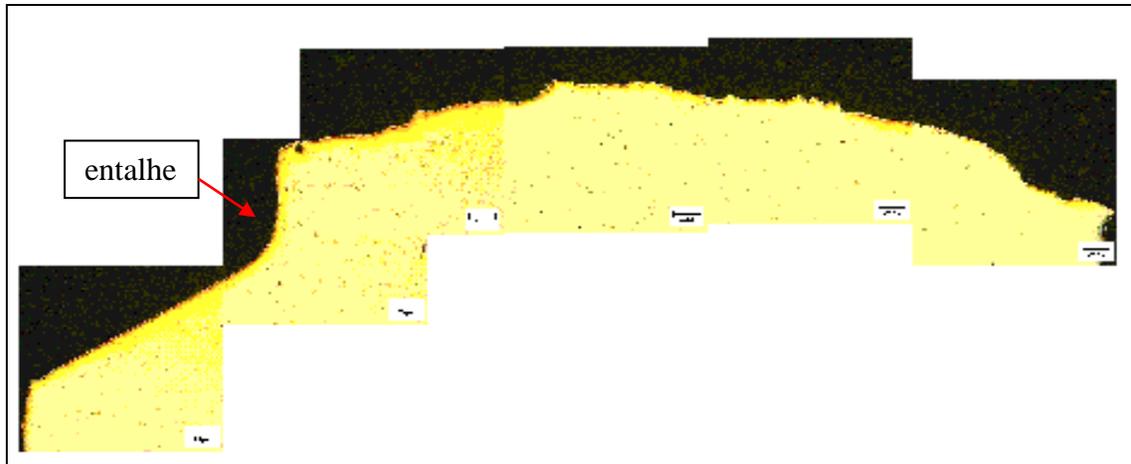


Figura 22 -Montagem do perfil de fratura de um corpo de prova entalhado na orientação T-L. Aumento de 14 X.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A Figura 23 exibe uma montagem tridimensional dos três principais planos metalográficos do material investigado no presente estudo.

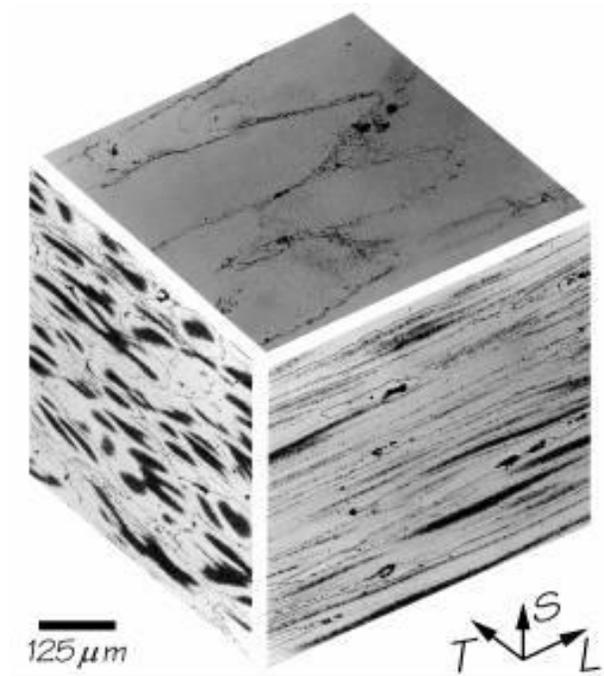
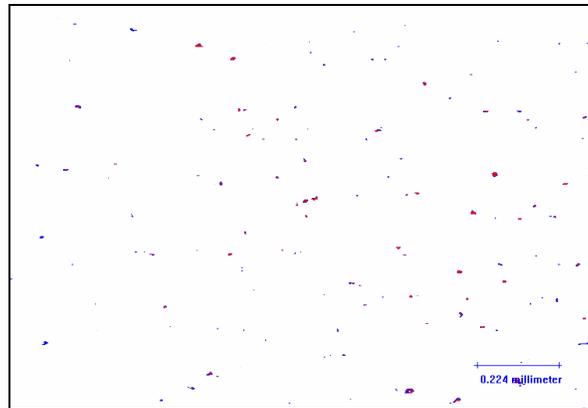


Figura 23 – Montagem tridimensional das principais direções metalográficas L, S, T, da liga de alumínio 7475 T7351.

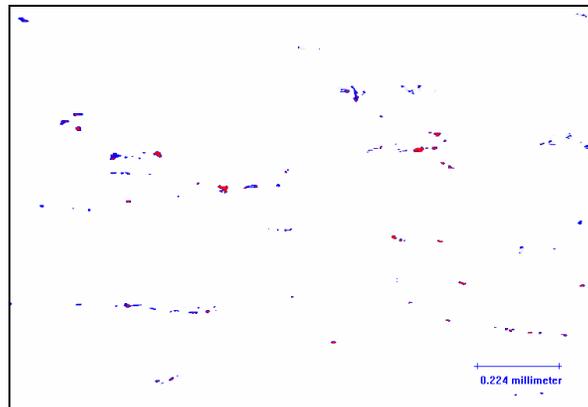
Observa-se nitidamente o alongamento dos grãos no sentido do trabalho mecânico, e a forte presença de textura, especialmente na direção L (plano SL), e em menor escala, na direção T (plano ST).

5.2– ANÁLISE QUANTITATIVA DE SEGUNDAS FASES

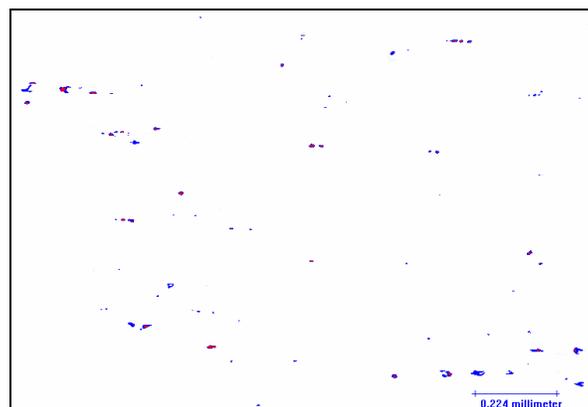
A figura 24 exibe fotos dos três planos metalográficos principais da placa forjada, mostrando a distribuição das segundas fases. A figura 25 apresenta um diagrama em que são discriminados os dois tipos de segundas fases identificados na liga de alumínio 7475, a saber, inclusões e intermetálicos. Observa-se que a direção S (plano TL) apresenta máxima concentração tanto de intermetálicos como de segunda fases. A direção L (plano ST) apresenta uma distribuição uniforme de inclusões e intermetálicos e na direção T (plano SL) encontra-se a menor concentração de inclusões, pois este plano sofre o maior esforço do trabalho mecânico. Os resultados mais detalhados de contagem de segundas fases são fornecidos na Tabela II do Anexo C.



(a)



(b)



(c)

Figura 24 – Planos metalográficos ST (a), TL (b) e SL (c) observadas sem ataque, mostrando a distribuição de segundas fases.

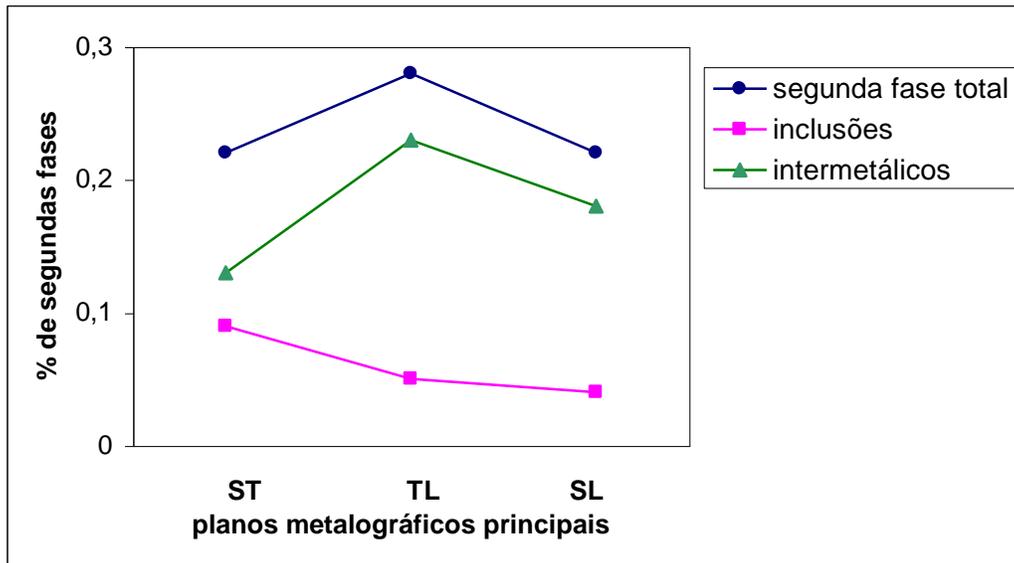


Figura 25 – Porcentagens de inclusões, intermetálicos e segundas fases totais nos três planos metalográficos.

5.3 – ANÁLISE QUÍMICA.

A Tabela III apresenta o resultado da análise química da liga estudada, em porcentagem em peso. Comparando os resultados obtidos com os dados da norma SAE ASM 2355, verifica-se que a composição química do material encontra-se dentro dos valores máximos e mínimos dos elementos especificados pela norma.

Tabela III – Composição química, em % em peso, obtida para a liga de alumínio 7475-T73 T7351, pela técnica de espectrometria de emissão óptica por centelhamento.

Elemento Químico	% em peso
Si	0,047
Fé	0,065
Cu	1,763
Mn	0,003
Mg	1,949
Cr	0,239
Ni	0,005
Zn	5,793
Ti	0,052
Ca	Não Detectado
P	0,010
Pb	0,001
Sb	0,004
Sn	0,002
Sr	Não Detectado
V	0,001
Zr	0,012
B	0,0005
Cd	Não Detectado
Co	0,002
Al	Balanço

5.4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO CHARPY INSTRUMENTADO.

Um quadro-resumo de todos os resultados obtidos no presente trabalho é fornecido na Tabela IV, no Anexo C. Nele são apresentados os valores da energia na carga máxima, E_{pm} , carga máxima, P_m , deslocamento de carga máxima, S_{pm} , tempo na carga máxima, t_{pm} , energia total, E_{tot} , deslocamento total, S_{tot} , e tempo total, t_{tot} .

5.4 - GRÁFICOS OBTIDOS DOS ENSAIOS DE IMPACTO INSTRUMENTADO DE CORPOS DE PROVA ENTALHADOS E PRÉ – TRINCADOS.

Nas figuras 26 e 27 são mostradas as curvas de carga-deslocamento (P vs S) dos corpos de prova entalhados e pré-trincados, nas quatro orientações avaliadas neste estudo. Observa-se que ocorre uma tendência do aumento de carga máxima e do deslocamento total na fratura, segundo a seqüência: T-L < T-S < L-T < L-S, indicando uma capacidade de absorção de energia, segundo a referida seqüência. As figuras 28 – 31 mostram as curvas P vs S obtidas dos espécimes entalhados e pré-trincados, separadamente, para cada uma das quatro orientações principais. Observa-se a tendência dos cdps entalhados de apresentar maior valor de carga máxima em relação aos pré-trincados, indicando, portanto, que os primeiros devam absorver maior quantidade de energia no processo de fratura, ou seja, apresentam maior tenacidade. Isto era esperado, tendo em vista que nos caso dos corpos de prova entalhados despende-se energia para a nucleação e a propagação de uma trinca. Nota-se também, que as orientações que apresentam maior nível de tenacidade, são as que exibem maior nível de oscilação dos sinais de carga e seus gráficos filtrados são praticamente idênticos (figuras 30 e 31). No anexo A são fornecidas todas as curvas P vs S e P vs t obtidas no presente trabalho.

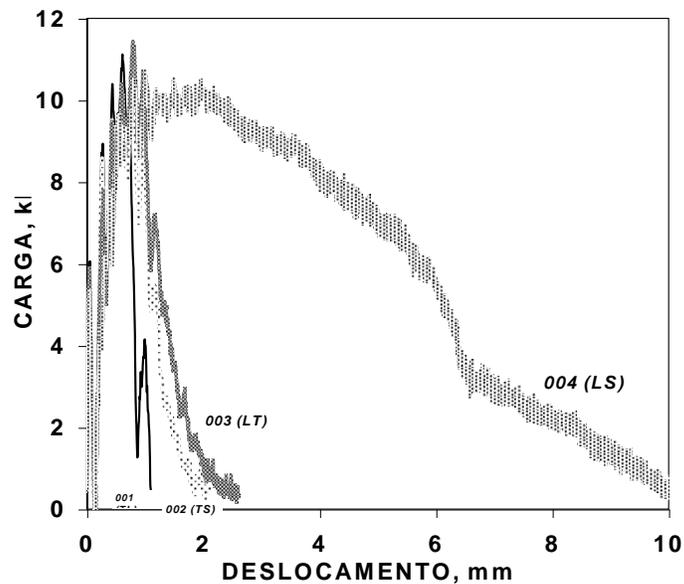


Figura 26 – Gráficos de carga-deslocamento dos corpos de prova entalhados nas orientações T-L, T-S, L-T e L-S, respectivamente. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

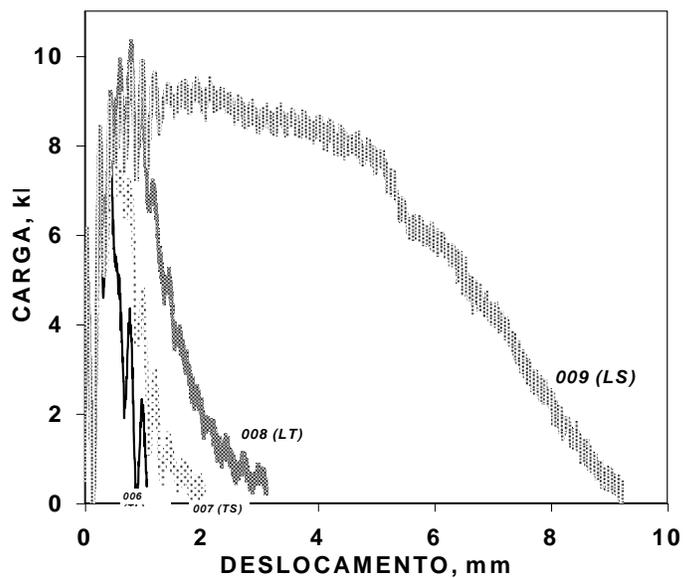


Figura 27 – Curvas de carga-deslocamento dos corpos de prova pré-trincados nas orientações T-L, T-S, L-T e L-S, respectivamente. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

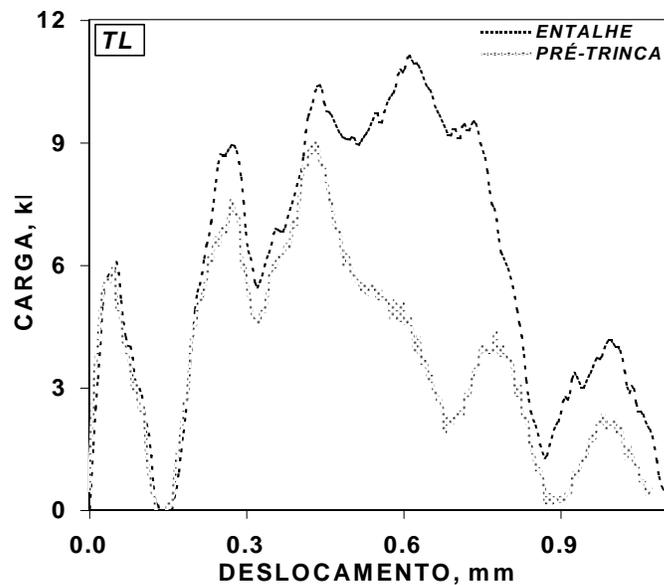


Figura 28 - Gráficos de carga-deslocamento na orientação T-L, obtidos de ensaios de corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

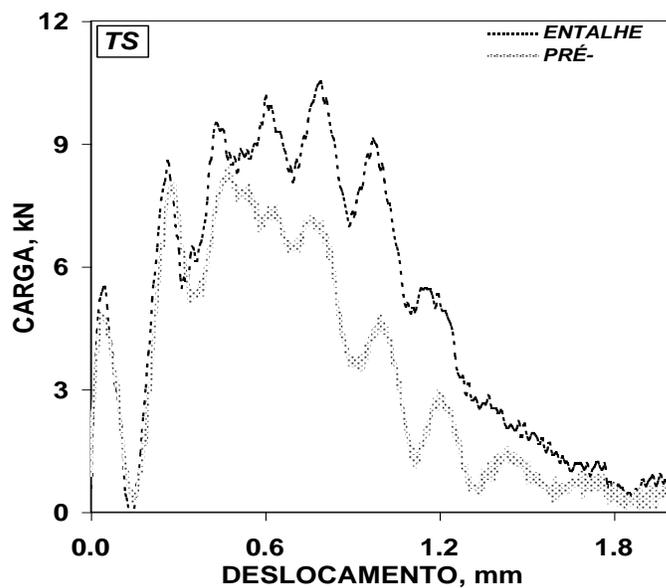


Figura 29 - Curvas de carga-deslocamento na orientação T-S, obtidos de corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

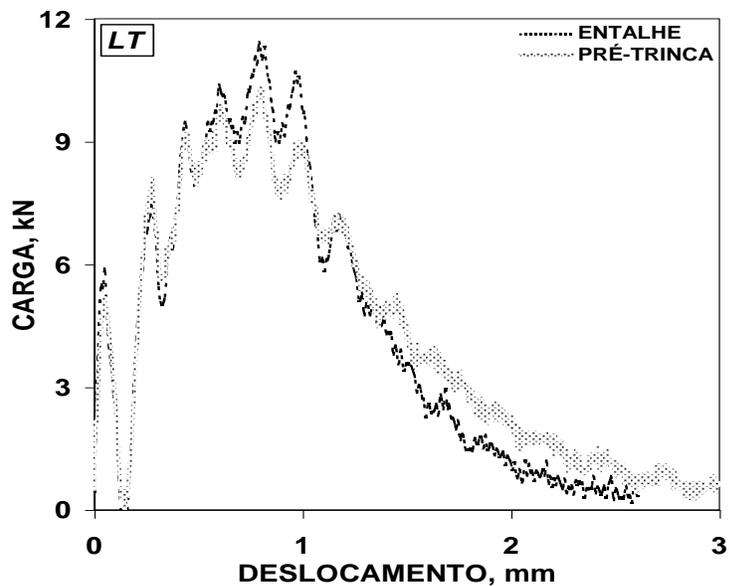


Figura 30 - Gráficos de carga-deslocamento na orientação L-T, obtidos de corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

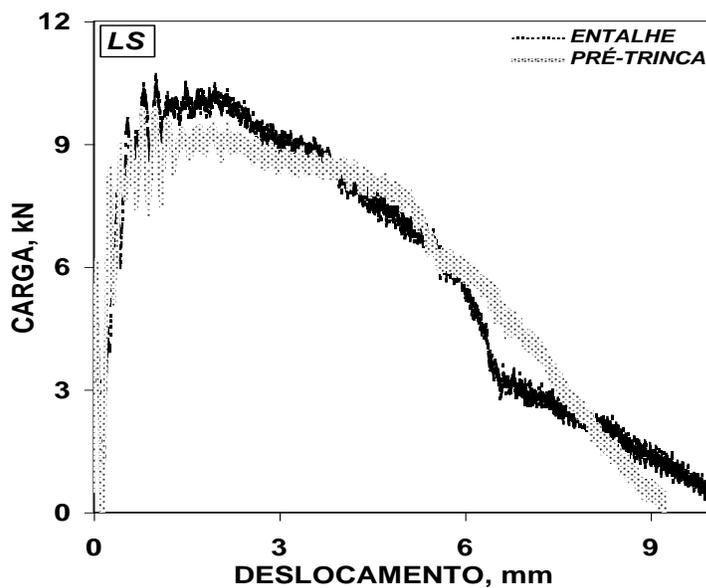


Figura 31 – Curvas de carga-deslocamento na orientação L-S, obtidos a partir de ensaio de impacto de corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

As oscilações originais nos sinais de carga foram eliminadas ou minimizadas por média móvel [23], via os programas Matlab e Excel, mais as condições de polimento empregadas (vide item 4.7.1). As figuras 32 e 33 mostram os resultados de carga máxima atingidos nos corpos de prova entalhados e pré-trincados, nas quatro direções principais. Verifica-se que a carga máxima suportada pelos cdps entalhados é invariavelmente superior aos respectivos cdps pré-trincados. Isto ocorre devido à existência da trinca nos cdps pré-trincados, eliminando o estágio de nucleação. Assim, no caso dos cdps pré-trincados serão necessários níveis de carregamento menores para que a trinca se propague. Por outro lado, no processo de fratura dos espécimes entalhados depende-se energia tanto para nuclear a trinca na frente do entalhe, como para propagá-la através do ligamento remanescente do corpo de prova. O processo de nucleação da trinca necessita que a deformação plástica seja suficientemente elevada para nuclear a trinca dentro da zona plástica, exigindo carregamentos maiores.

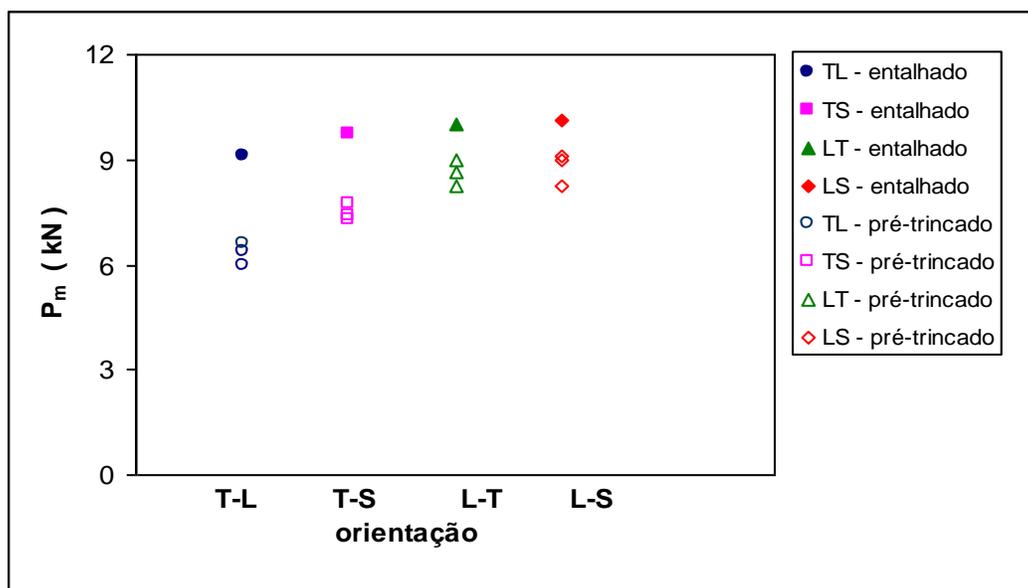


Figura 32 - Influência do raio de curvatura do entalhe avaliado nos valores de carga máxima para os cdps entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

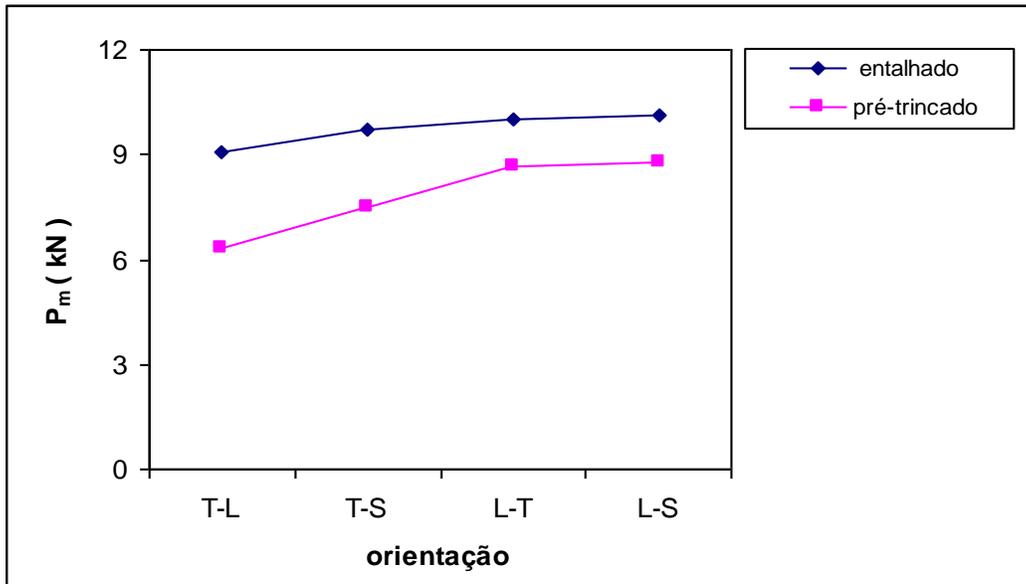


Figura 33 - Influência do raio de curvatura do entalhe nos valores de carga máxima para os cdps entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

As figuras 34 e 35 mostram a influência da orientação dos cdps nos valores percentual e absoluto da energia absorvida até a carga máxima, E_{pm} , e da energia absorvida após a carga máxima até a fratura total, admitida como sendo energia de propagação, E_p , para as quatro orientações. Nota-se que a orientação T-S foi a mais suscetível ao pré-trincamento e a orientação L-S absorveu mais energia até e após a carga máxima, indicando um forte efeito da textura do material na propagação da trinca.

As figuras 36 e 37 mostram a influência da orientação dos cdps nos valores percentual e absoluto de energia absorvida até a carga de início de propagação da trinca, E_i , e a energia após a carga de início até a fratura total, denominada energia de propagação real, $E_{p \text{ real}}$, para as quatro orientações. Nota-se que os valores da E_i , dos cdps pré-trincados são inferiores, porém, próximos dos valores obtidos dos cdps entalhados para as orientações

T-L, T-S e L-T. Entretanto, ocorre uma inversão de valores na orientação L-S. Assim, para esta orientação, o raio de curvatura do entalhe, comparado com o raio da ponta da trinca não exerce forte influência, indicando que a microestrutura controla o processo de fratura

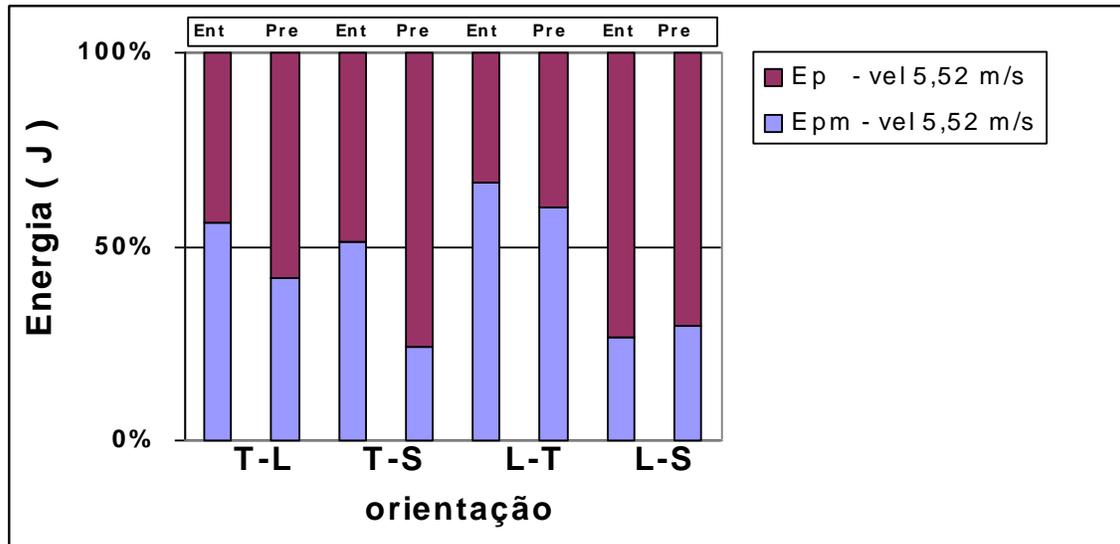


Figura 34 – Influência da orientação dos corpos de prova nos valores percentuais de energia de carga máxima, E_{pm} e energia de propagação de trinca, E_p , dos corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

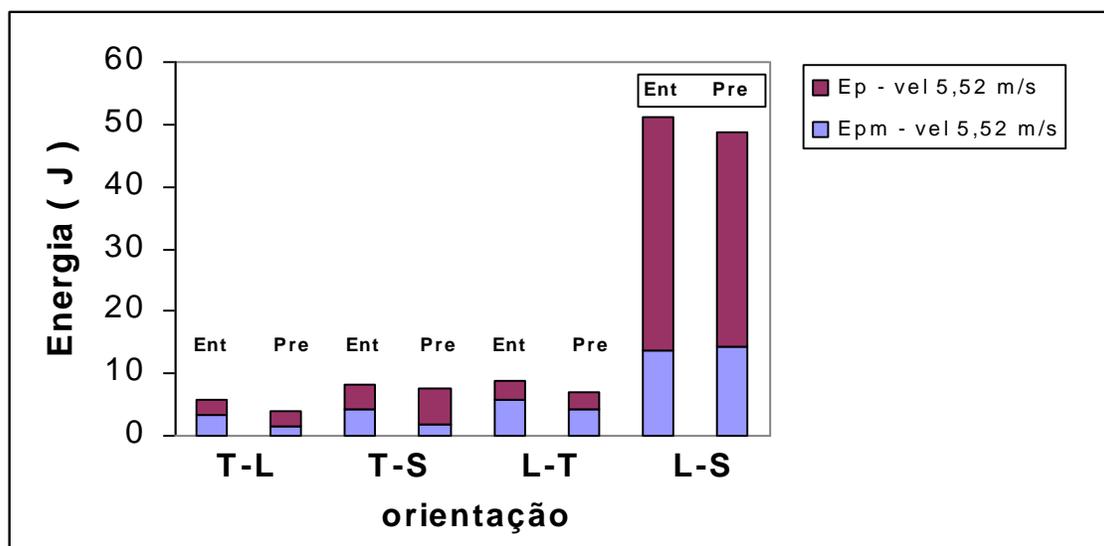


Figura 35 – Influência da orientação dos corpos de prova nos valores absolutos de energia de carga máxima, E_{pm} , e energia de propagação de trinca, E_p , dos corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

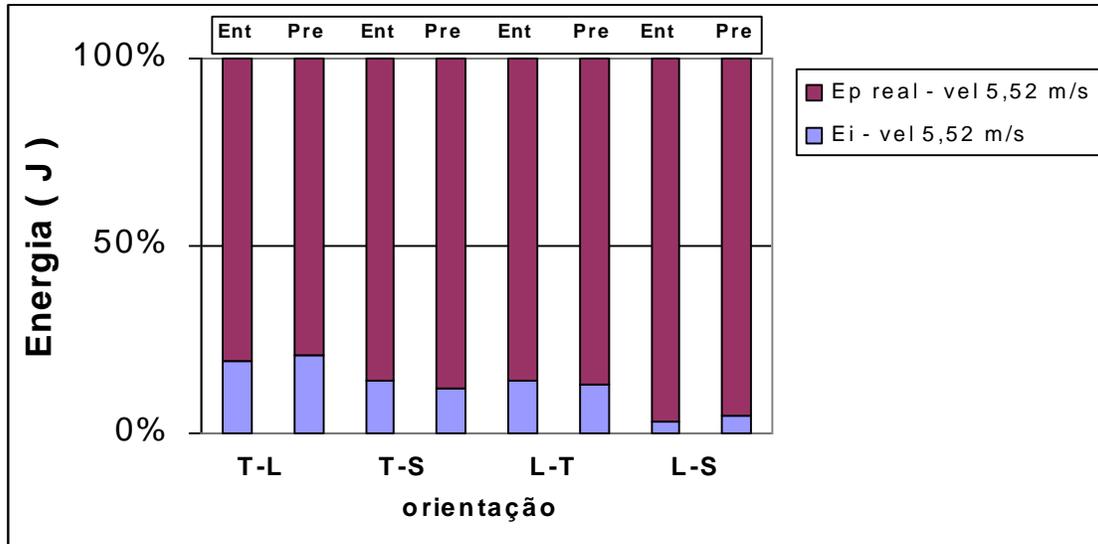


Figura 36 – Influência da orientação dos cdps, nos valores percentuais de energia de carga de início de propagação de trinca, E_i , e de energia de propagação real, $E_{p \text{ real}}$, dos corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s..

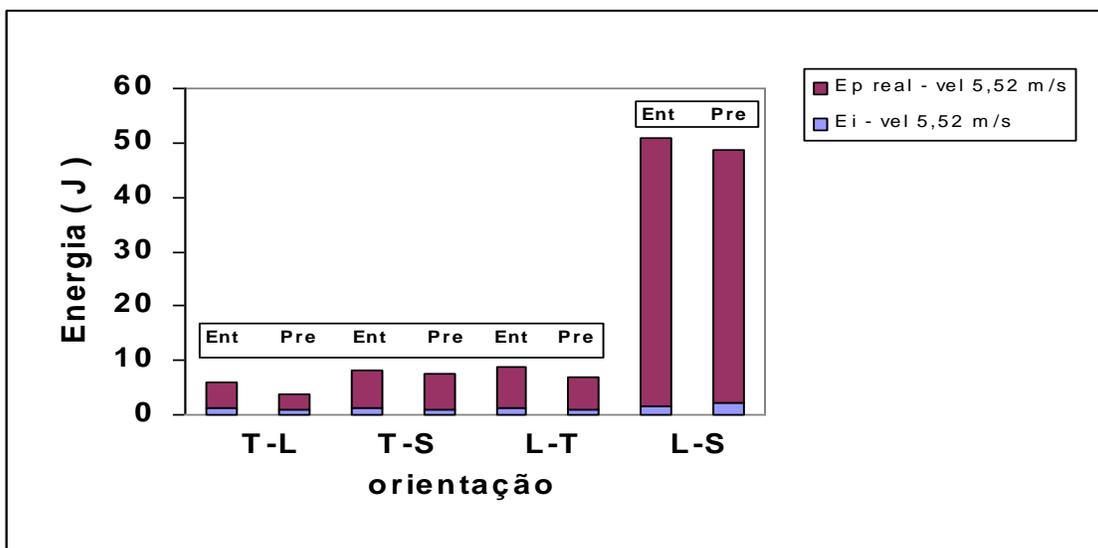


Figura 37 – Influência da orientação dos cdps, nos valores absolutos de energia de carga de início de propagação de trinca, E_i , e de energia de propagação real, $E_{p \text{ real}}$, dos corpos de prova entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

A figura 38 apresenta os resultados das relações das energias, E_{pm} , E_p , E_i , dos corpos de prova pré-trincados/entalhados, nas quatro orientações. Observa-se que para a orientação L-S, os valores da E_{pm} dos cdps pré-trincados são maiores que nos entalhados. Isto ocorre

devido à orientação L-S absorver grande quantidade de energia, caracterizando-se como a orientação mais dúctil.

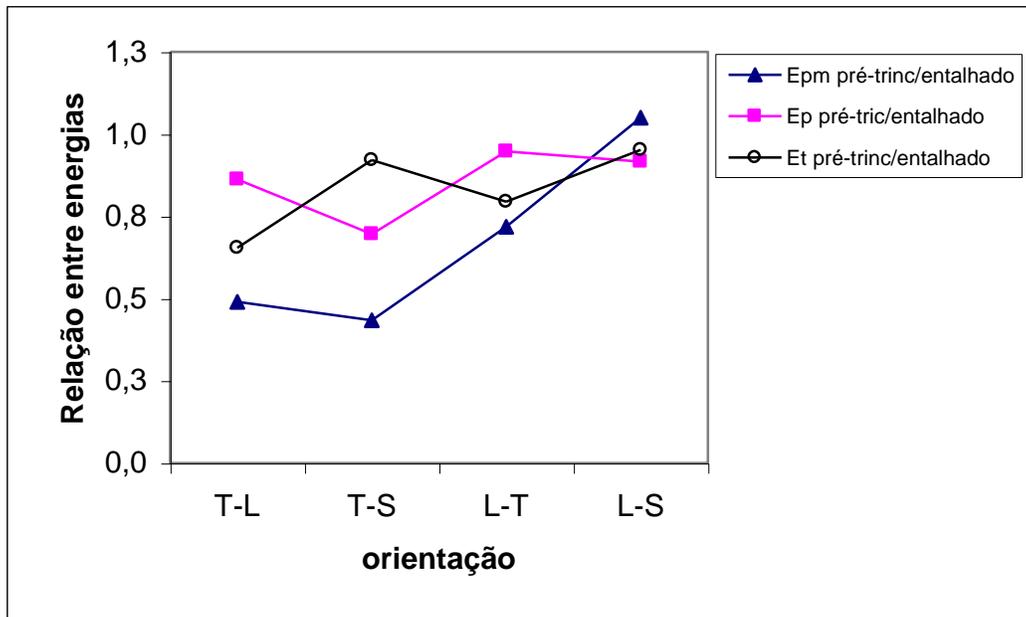


Figura 38 – Influência da orientação, do raio de curvatura do entalhe e do pré-trincamento dos cdps nos valores das relações de energias E_{pm} , E_p e E_t . Velocidade de carregamento 5,52 m/s.

A figura 39 mostra o comportamento das energias de carga máxima e de propagação de trinca, já citadas, em função da variação da velocidade de carregamento nos corpos de prova pré-trincados. Nota-se que os valores da E_{pm} não sofrem alteração significativa com a redução da velocidade de carregamento de 5,52 para 2,25 m/s nas orientações T-L, T-S e L-T, porém, a orientação L-S apresenta uma redução do valor de energia de carga máxima quando ocorre a redução da velocidade de carregamento de 5,52 para 4,0 m/s e mantendo-se inalterada quando a velocidade é reduzida para 3,2 m/s.

A figura 40 mostra os dados obtidos das energias de início de propagação da trinca e de propagação real, em função da variação da velocidade de carregamento, nos corpos de prova pré-trincados. Observa-se que os valores de início de propagação da trinca, E_i ,

reduziram-se sensivelmente para as quatro orientações dos corpos de prova com a redução da velocidade de carregamento, ou seja, menor energia é absorvida na fratura.

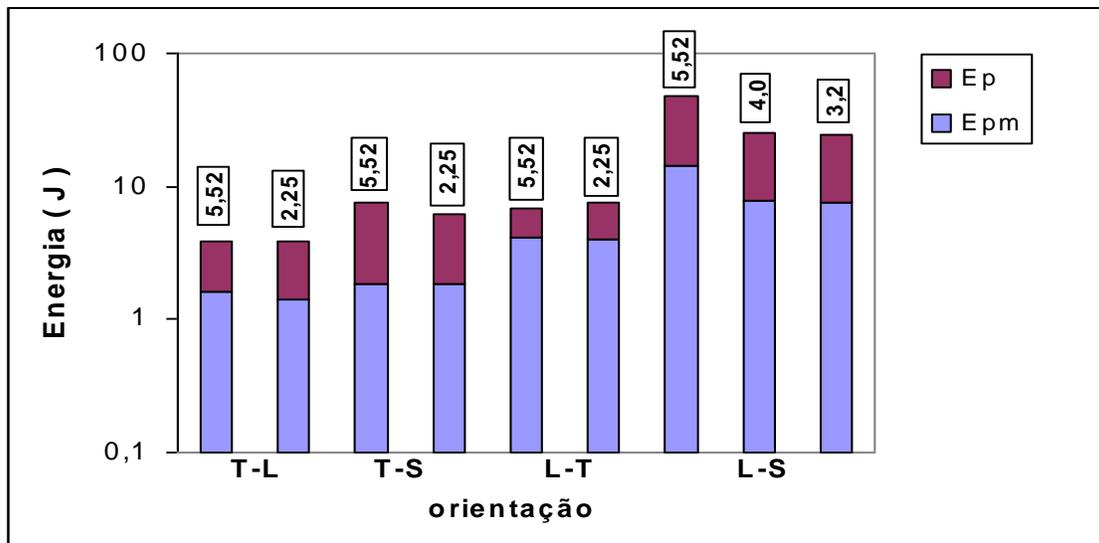


Figura 39 – Influência da orientação dos corpos de prova, nos valores absolutos da energia na carga máxima e energia de propagação da trinca nos corpos de prova pré-trincados, em função da velocidade de carregamento.

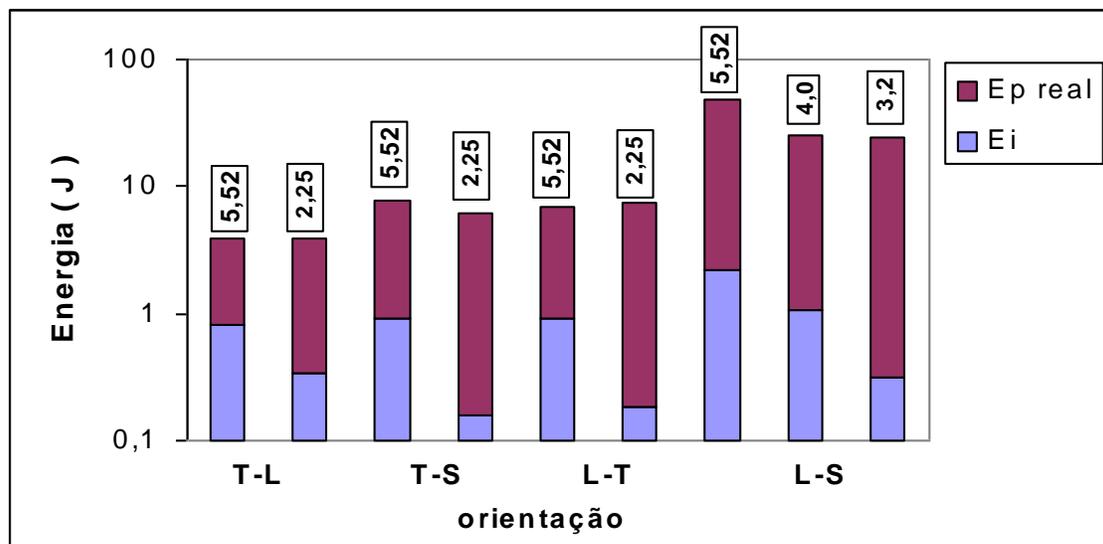


Figura 40 – Influência da orientação dos corpos de prova, nos valores absolutos da energia na carga de início de propagação da trinca e energia de propagação real dos corpos de prova pré-trincados, em função da variação da velocidade de carregamento.

5.4.2– DETERMINAÇÃO DO PONTO REAL DE INÍCIO DE PROPAGAÇÃO DA TRINCA PELO MÉTODO DA TAXA DE VARIAÇÃO DA FLEXIBILIDADE

Com a eliminação ou minimização das oscilações das curvas carga-deslocamento e admitindo-se que o material, sob tais circunstâncias apresente características dúcteis (vide item 4.7.1), foi determinada a variação na flexibilidade. O ponto de início de propagação da trinca foi determinado segundo Kobayashi [19], conforme apresentado no item 3.9. No anexo B são fornecidas as curvas de PxS, com a eliminação ou minimização dessas oscilações e com os valores da taxa de variação da flexibilidade obtidos. A orientação T-S apresentou um comportamento mais frágil (Elástico-Linear) e a orientação L-S mostrou um comportamento mais dúctil (Elasto-Plástico), como ilustrado nas figuras 17 e 18 no item 4.7. A figura 41 mostra os valores estimados da energia de escoamento, E_e , e de energia de início de propagação da trinca, E_i , para as quatro orientações, para os cdps pré-trincados. Nota-se que a energia de início de propagação da trinca, E_i , está próxima da energia do escoamento, E_e , nas orientações T-L, T-S e L-T e distancia-se da orientação L-S. Este fato indica que nesta última orientação, o mecanismo de início de crescimento de trinca consome níveis superiores de energia, embora a energia consumida na zona plástica seja praticamente a mesma nas quatro orientações, conforme ilustra a figura 41. Isto se deve provavelmente ao fato de que o início do crescimento ou propagação da trinca pré-existente envolve, além da geração da zona plástica, fenômenos tais como arredondamento e estiramento da ponta da trinca, sob carga dinâmica.

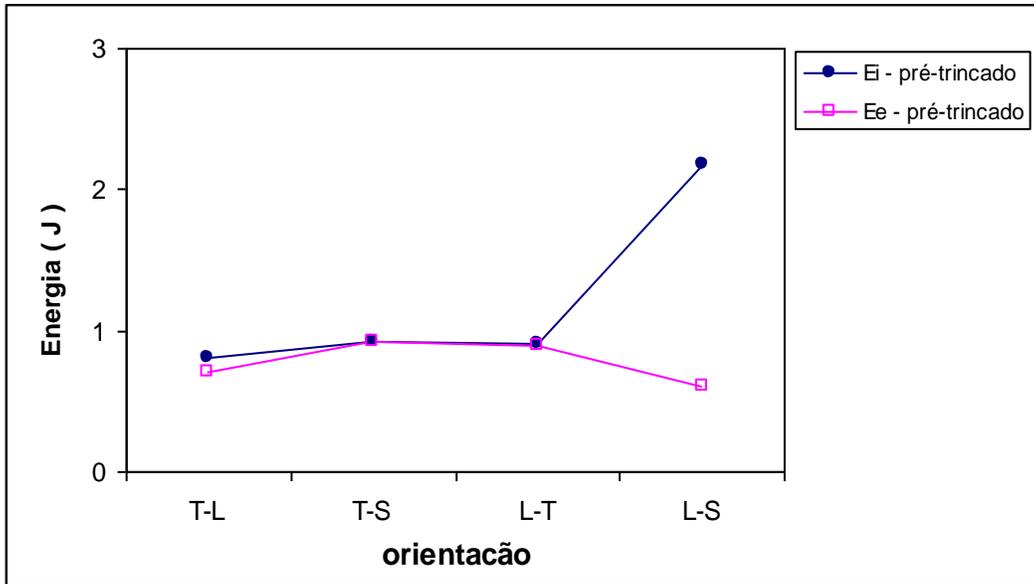


Figura 41 – Valores estimados da energia de escoamento, E_e , e energia de início de propagação da trinca, E_i . Velocidade de carregamento 5,52 m/s.

A figura 42 mostra os valores das energias de escoamento, E_e , e da energia de início de propagação da trinca, E_i , para as quatro orientações, em função da variação da velocidade de carregamento. Observa-se que todas as orientações apresentaram redução dos valores das energias E_e e E_i , com a diminuição do valor da velocidade de carregamento, ao contrário dos valores estimados de E_{pm} , onde somente a orientação L-S apresentou redução, conforme mostrado na figura 39.

A figura 43 mostra que os valores do limite de escoamento dinâmico, σ_{yd} , são menores que os valores do limite de escoamento obtido em carregamento quase estático convencional, S_e , para as orientações T-L e L-T [32]. Este mecanismo ocorre provavelmente devido a um aquecimento localizado, em consequência de uma alta taxa de carregamento no processo de fratura, levando a uma diminuição do limite de escoamento dinâmico do material. Estima-se que isto ocorra devido ao corpo de prova ser submetido a uma velocidade de carregamento alta durante um tempo muito pequeno, gerando assim, um

aumento localizado de temperatura durante o processo de fratura e acarretando diminuição do limite de escoamento dinâmico do material.

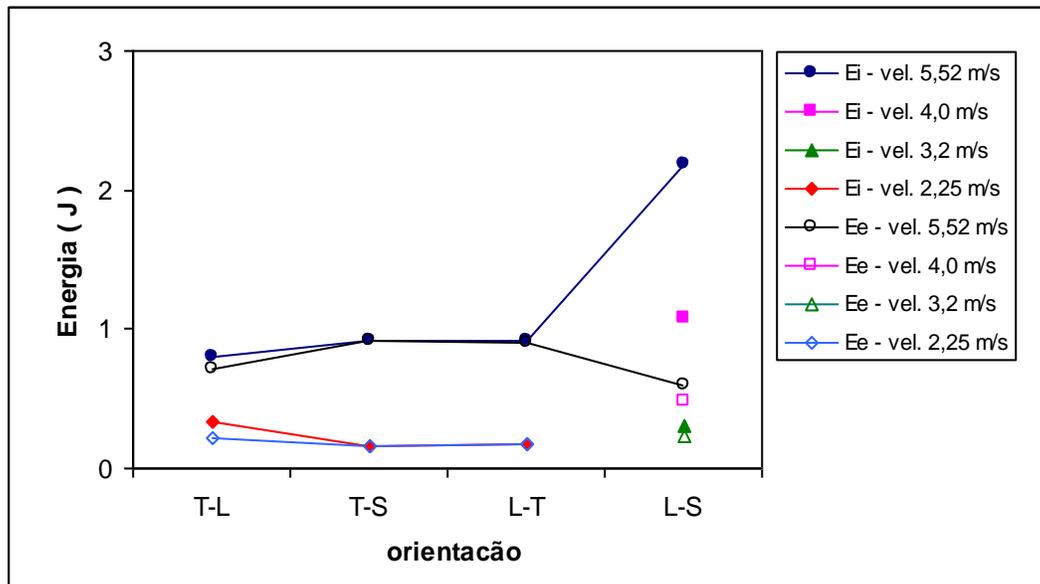


Figura 42 – Valores da energia de escoamento, E_e , e da energia de início de propagação da trinca, E_i , em função da velocidade de carregamento em cdps pré-trincados.

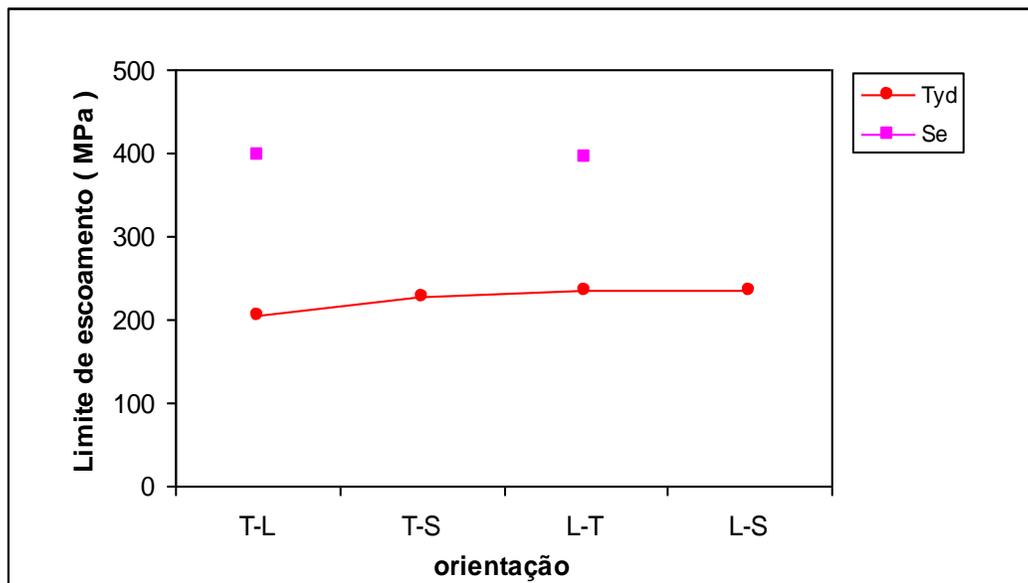


Figura 43 – Valores do limite de escoamento dinâmico, σ_{yd} , na velocidade de carregamento de 5,52 m/s, comparados com os valores de limite de escoamento quase estático, S_e .

5.5 – TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA ELASTO-PLÁSTICA, J_{Id} .

Os valores da tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástica, J_{Id} , para as quatro orientações avaliadas, foram obtidos pela equação proposta por Rice, vide item 3.9. Para isto, foram utilizadas a energia absorvida até o ponto de carga máxima, E_{pm} , e a energia de início de propagação de trinca, E_i , determinada pelo método de variação da flexibilidade, como explicado no item 5.4.2. A figura 44 mostra que os valores de J_{Id} obtidos pela energia E_{pm} , para a velocidade de carregamento de 5,52 m/s, exibem uma tendência nítida de crescimento segundo a seqüência de direções $T-L < T-S < L-T < L-S$. Com a redução da velocidade de carregamento de 5,52 m/s para 2,25 m/s os valores de J_{Id} não variaram para as direções T-L, T-S e L-T. Estima-se que a energia de propagação de trinca de E_i a E_{pm} não se altera, ou seja, a redução da velocidade de carregamento não interfere na sua propagação. Na orientação L-S, que se apresenta como a mais dúctil das quatro orientações, o valor de J_{Id} decresceu com a redução da velocidade de carregamento de 5,52 m/s para 4,0 m/s, mantendo-se com um valor praticamente constante de 3,2 m/s. A Tabela V no Anexo C mostra um quadro resumo dos resultados da tenacidade à fratura dinâmica. A figura 45 mostra os valores de J_{Id} obtidos por meio dos valores de E_i , com velocidade de carregamento 5,52 m/s, e que encontram-se muito próximos para as orientações T-L, T-S e L-T, mas aumentando substancialmente para a orientação L-S. Com a diminuição da velocidade de carregamento de 5,52 para 2,25 m/s, os valores de J_{Id} foram sensivelmente reduzidos para as orientações T-L, T-S e L-T. Já a orientação L-S originou uma expressiva redução de J_{Id} quando a velocidade foi reduzida de 5,52 m/s para 4,0 m/s e, novamente,

quando reduzida para 3,2 m/s. Estes resultados, como já esperado, seguem a mesma tendência dos resultados mostrados na figura 42.

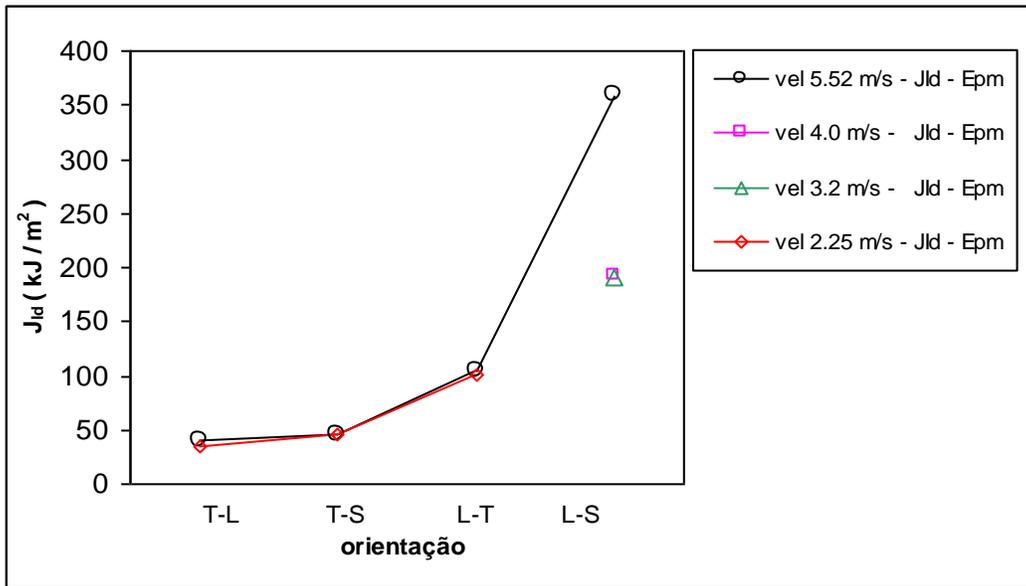


Figura 44 – Valores de tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , obtidos por meio da energia de carga máxima, E_{pm} , em função da variação da velocidade de carregamento.

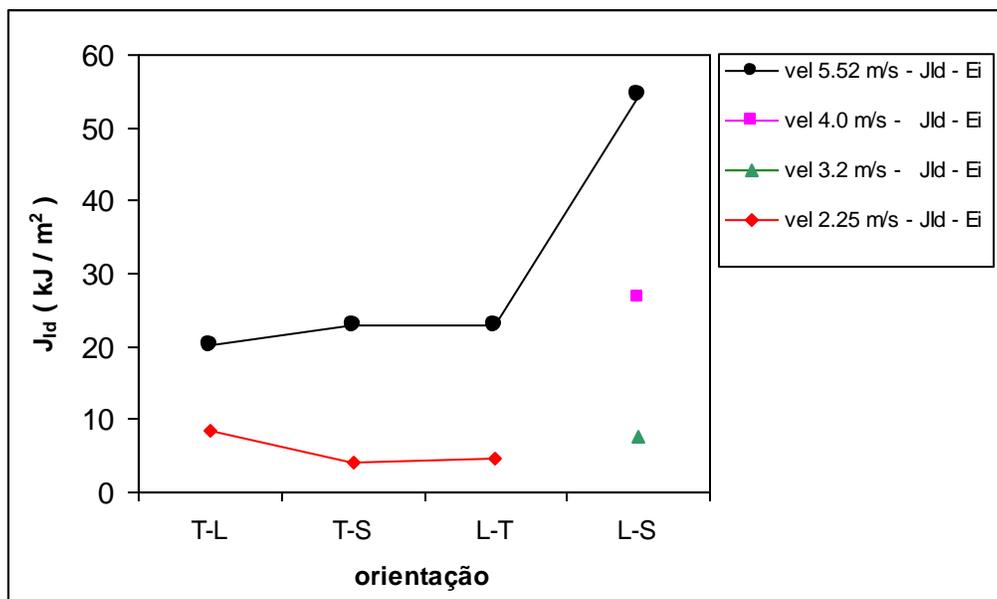


Figura 45 – Valores de tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , obtidos pela energia de início de propagação da trinca, E_i , em função da variação da velocidade de carregamento.

Os fatos observados nas figuras 44 e 45 são concordantes com o raciocínio desenvolvido por Anderson [9]: “... os materiais intrinsecamente dúcteis, que não apresentam transição dúctil-frágil, tais como as ligas de alumínio, têm seu processo de fratura controlado por deformação, ao contrário, por exemplo, dos aços ferríticos no patamar inferior de temperatura, cujo processo de fratura é controlado por tensão. Nestas condições, um aumento na taxa de carregamento por si só inibe a capacidade do material em responder à sollicitação por deformação plástica. Isso faz com que uma certa quantidade de energia seja necessária para que a deformação plástica crítica para fratura seja alcançada no interior da zona plástica deformada”.

5.6 –TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA, K_{Id} , CALCULADA POR MEIO DE J_{Id} .

Considerando-se os valores de J_{Id} obtidos de E_i e E_{pm} , tal como mencionados no item anterior, e admitindo-se que o valor do módulo de elasticidade da liga de alumínio, E , seja o mesmo para as quatro orientações dos corpos de prova e apresente o valor de 73 GPa, utilizando-se a relação $J_{Id} = \frac{K_{Id}^2}{E}$, comentada no item 3.11, foram obtidos os valores convertidos da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} . Os valores de K_{Id} estão plotados nas figuras 46 e 47, respectivamente por J_{Id} de energia de carga máxima e de início de propagação de trinca. Observa-se que seguem a mesma tendência dos resultados obtidos, porém mostram-se mais conservativos na transição dos conceitos utilizados da Mecânica de Fratura Elasto-Plástica, MFEP, para os da Mecânica de Fratura Elástica Linear, MFEL.

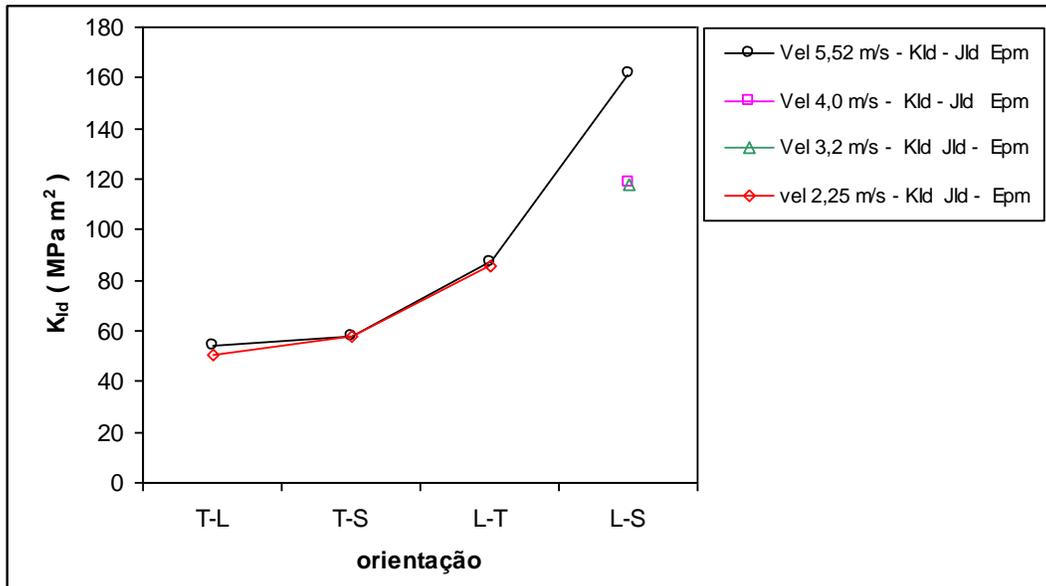


Figura 46 – Tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculada utilizando-se os valores de J_{Id} , que foram obtidos dos valores da energia absorvida na carga máxima, E_{pm} , sob diversas velocidades de carregamento.

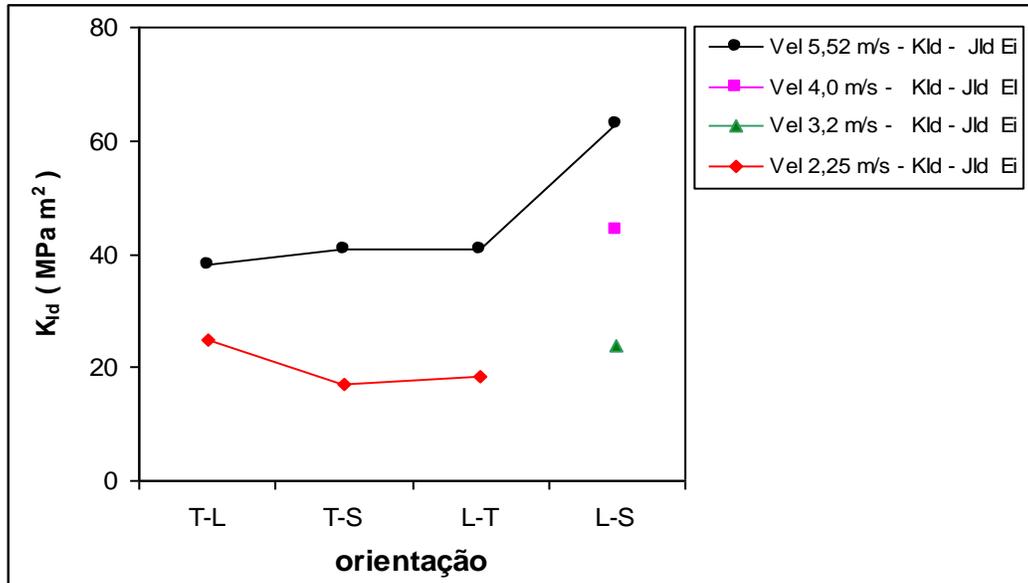


Figura 47 – Tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculada utilizando-se os valores de J_{Id} , que foram obtidos dos valores da energia absorvida no início de propagação da trinca, E_i , sob diversas velocidades de carregamento.

5.7 – TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA ELÁSTICA-LINEAR, K_{Id} , DE CARGA MÁXIMA E DE CARGA DE INÍCIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA.

Admitindo-se que os materiais que originaram as curvas de carga-deslocamento para as quatro orientações apresentem características frágeis, o método proposto por Angamuthu et alli [22], como comentado no item 3.7.1, foi utilizado para a estimativa dos valores de K_{Id} .

A figura 48 apresenta os valores obtidos segundo a expressão $K_{Id} = 4,67 P_m$, no ponto de carga máxima da curva carga-deslocamento. Este parâmetro apresenta uma tendência de crescimento de acordo com a seqüência de orientações $T-L < T-S < L-T = L-S$, sem apresentar alterações significativas com a variação da velocidade de carregamento. De fato, o cálculo dos valores de K_{Id} de carga máxima, como proposto por Angamuthu, apresentam menores espalhamentos e são sensivelmente mais conservativos que os convertidos de J_{Id} , conforme ilustrado na figura 46. Comparando-se os valores determinados por este último critério e considerando-se o nível de carregamento correspondente à carga de início de propagação da trinca, P_i , os valores de K_{Id} apresentam-se menores e mais sensíveis à variação da taxa de carregamento, em relação aos valores de K_{Id} de carga máxima. Os resultados são apresentados na figura 49.

Observa-se que os valores de K_{Id} obtidos pelo critério dúctil pela MFEP, pela conversão de $J_{Id} - E_{pm}$ e E_i e os obtidos pelo critério frágil pela MFEL, via P_m e P_i , a orientação L-S mantém-se como a mais tenaz.

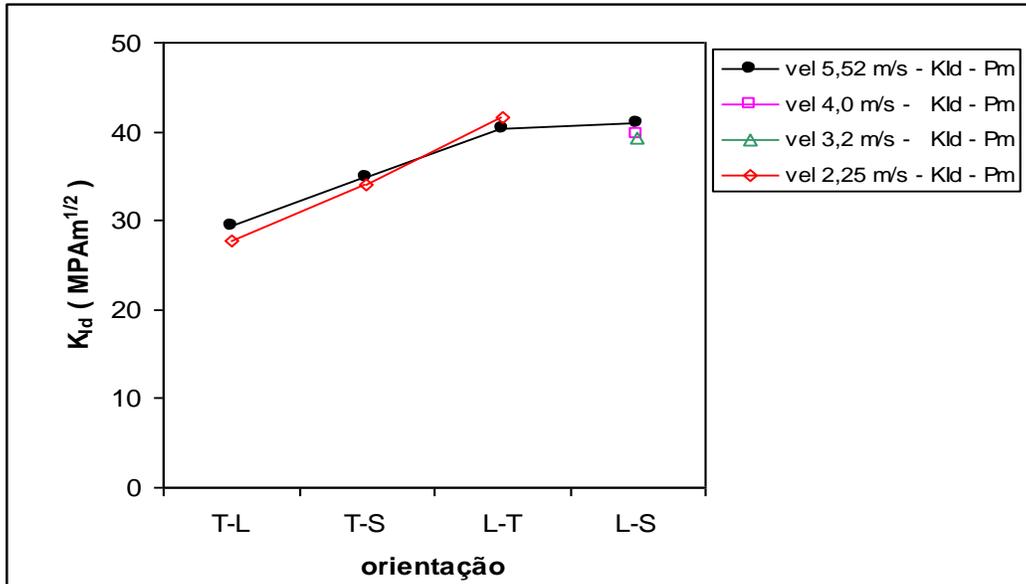


Figura 48 – Influência da orientação dos corpos de prova nos valores de tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculados pelos valores de carga máxima, para diversas velocidades de carregamento.

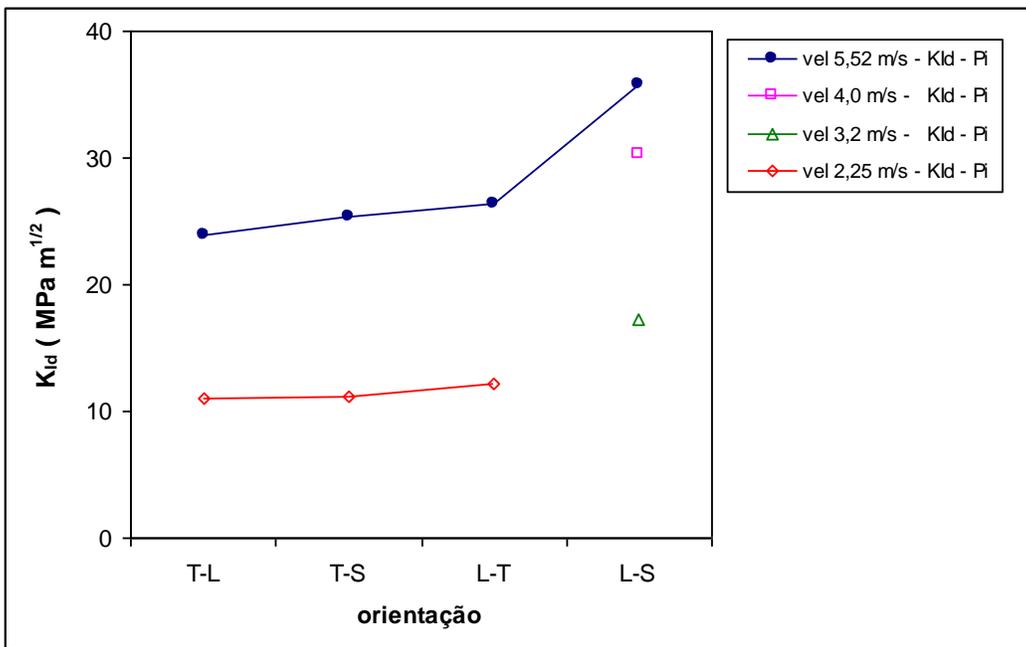


Figura 49 – Influência da orientação dos corpos de prova nos valores de tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculados pelos valores de carga de início de propagação da trinca, para diversas velocidades de carregamento.

5.8 – TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA, J_{Id} , CALCULADA A PARTIR DE VALORES DA TENACIDADE À FRATURA, K_{Id} .

Analogamente, porém de maneira inversa ao efetuado no ítem 5.6, os valores de J_{Id} foram obtidos dos K_{Id} determinados no item anterior, e estão apresentados nas figuras 50 e 51. Os resultados obtidos para todos os valores de J_{Id} e K_{Id} encontram-se no Anexo C.

Observa-se que os valores obtidos utilizando-se os conceitos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, MFEP, e recalculados pela teoria da Mecânica de Fratura Elástica Linear, MFEL, conforme comentado no ítem 5.6 e inversamente, os valores obtidos pela teoria da Mecânica da Fratura Elástica Linear e convertidos segundo os conceitos da Mecânica de Fratura Elasto-Plástica, como ilustram as figuras 50 e 51, indicam que estes valores tendem a se distanciar dos valores reais obtidos.

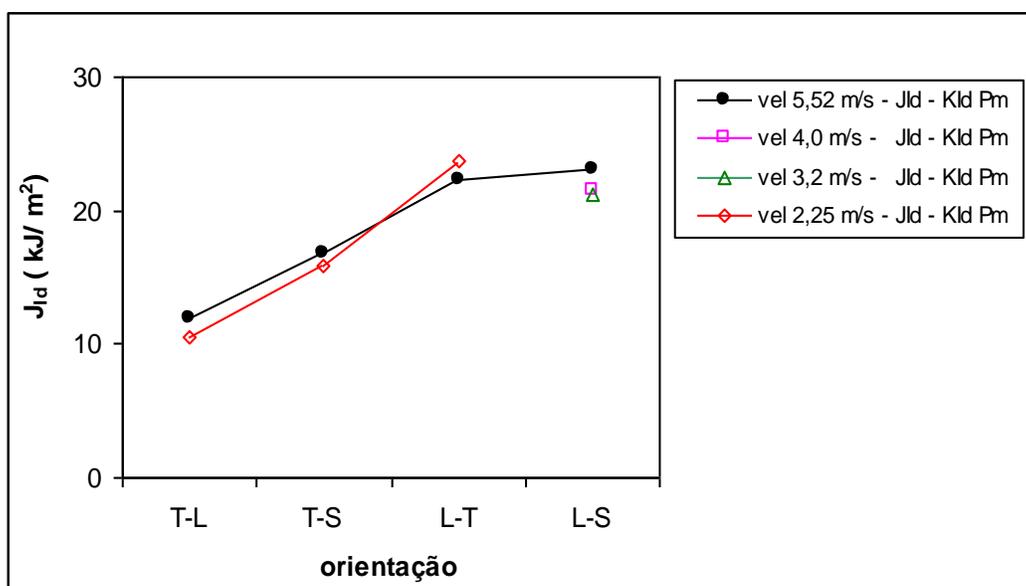


Figura 50 – Tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , calculada por meio de valores obtidos de K_{Id} , utilizando-se valores de carga máxima, P_m , sob diversas velocidades de carregamento.

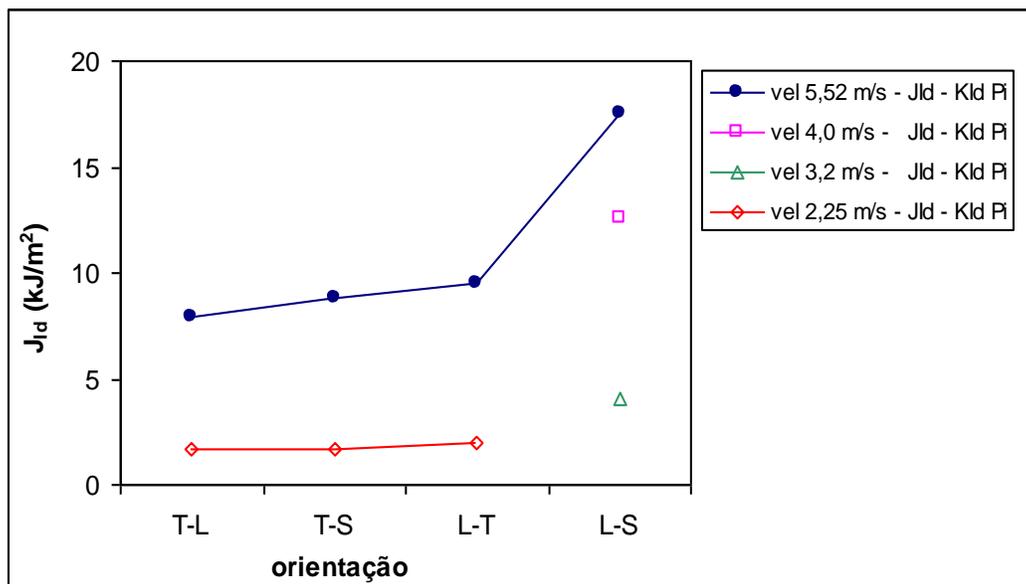


Figura 51 – Tenacidade à fratura dinâmica, J_{Id} , calculada pelos valores obtidos de K_{Id} , utilizando-se valores da carga de início de propagação da trinca, P_i , sob diversas velocidades de carregamento.

5.9 - CRITÉRIOS DE VALIDADE DO ENSAIO DE TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA.

Como sugerido por Angamuthu [22], para análise da validade dos resultados de tenacidade à fratura elasto-plástica dinâmica, J_{Id} , relativamente à predominância de deformação plana na ponta da trinca, foi utilizada a norma ASTM -E1820 [27], que impõe condições de dimensões mínimas ao cdp para a validade de medida da tenacidade à fratura quase estática, J_{Ic} . A figura 52 mostra que os valores de J_{Id} , obtidos da energia de início de propagação da trinca E_i são válidos para as quatro orientações. O mesmo ocorre com os valores de J_{Id} obtidos pela conversão de K_{Id} via carga máxima, P_m , e carga de início de

propagação da trinca, P_i , como mostrado nas figuras 53 e 54, e que indicam que as quatro orientações apresentam características dúcteis no processo de fratura.

A figura 55 mostra a validade dos valores de J_{Id} obtidos na condição de energia de carga máxima somente para as orientações TL e TS, com velocidade de carregamento 5,52 m/s.

As figuras 56, 57, 58 e 59 mostram a não validade dos valores de K_{Id} , obtidos de P_m , P_i , $J_{Id} - E_{pm}$ e $J_{Id} - E_i$, respectivamente pela norma ASTM E399, que considera a condição a , $b \geq 2,5 (K_{Ic} / \sigma_y)^2$ como critério de validade de K_{Ic} .

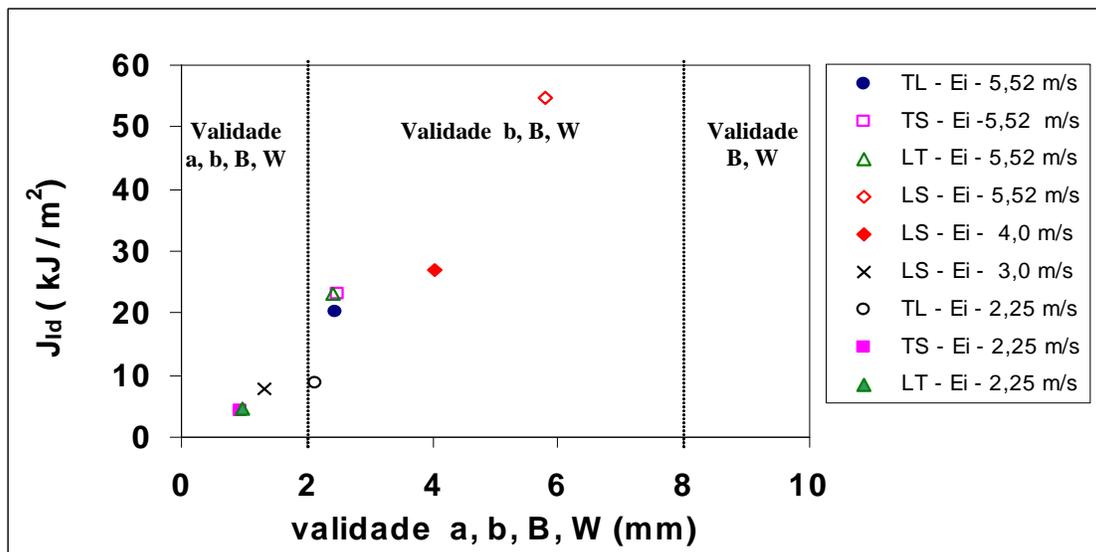


Figura 52 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , com base na energia de início de propagação da trinca, E_i , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.

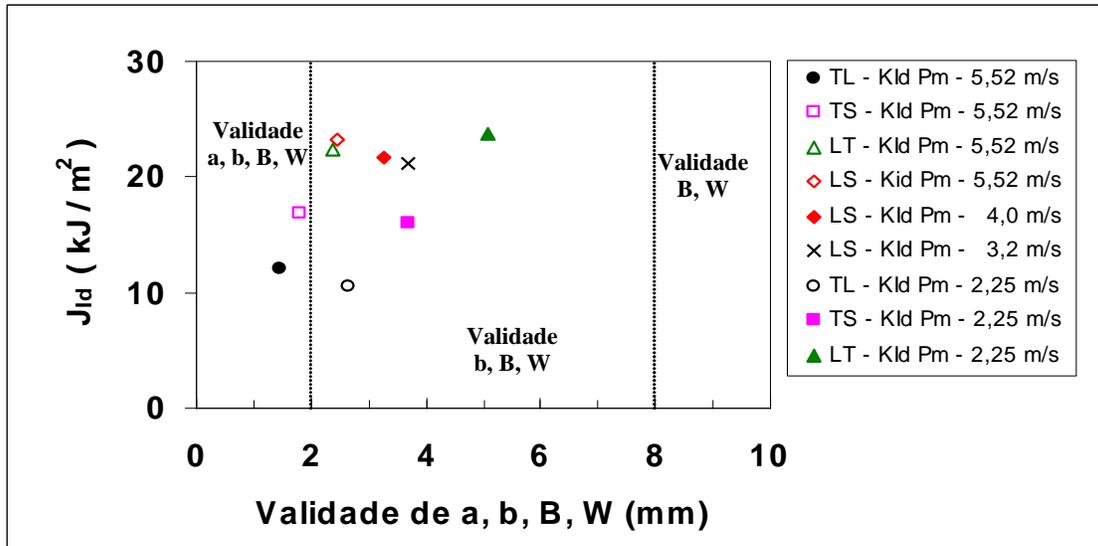


Figura 53 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , calculados por meio de $K_{Id} P_m$, para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.

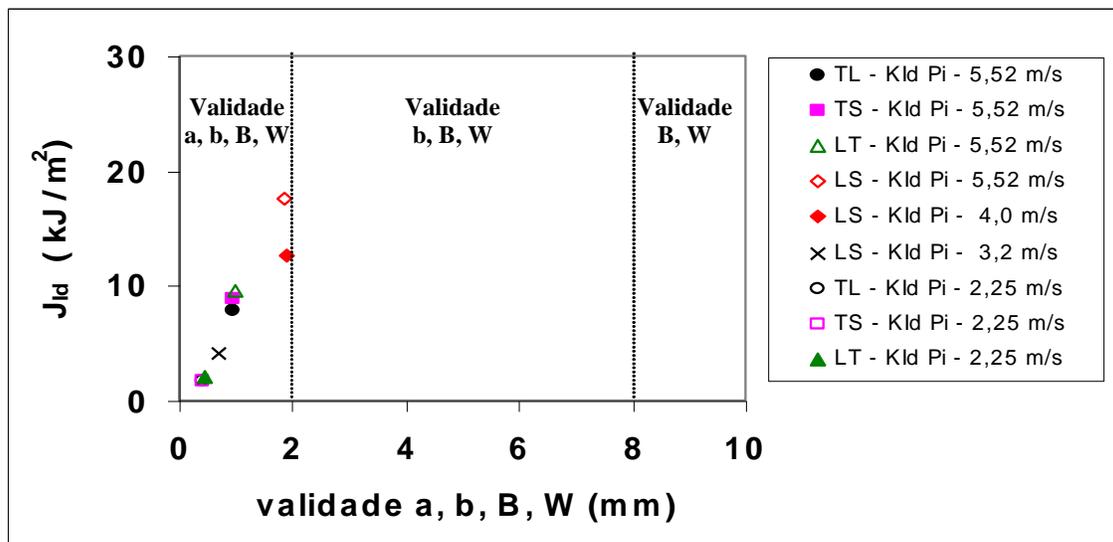


Figura 54 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , calculados por meio de $K_{Id} P_i$, para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.

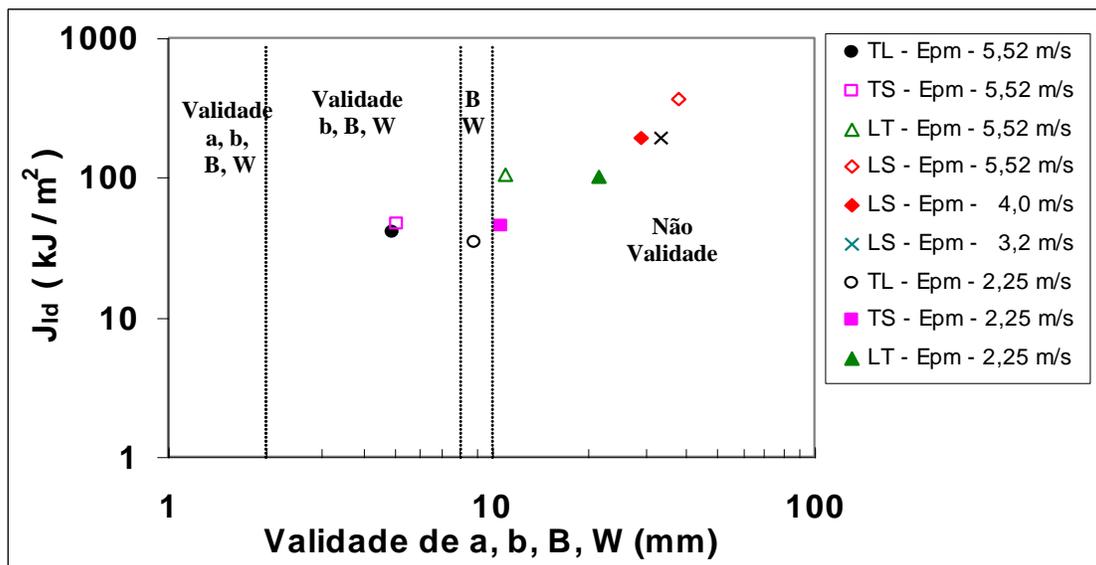


Figura 55 – Critério de validade dos resultados de J_{Id} , com base na energia de carga máxima, E_{pm} , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E1820.

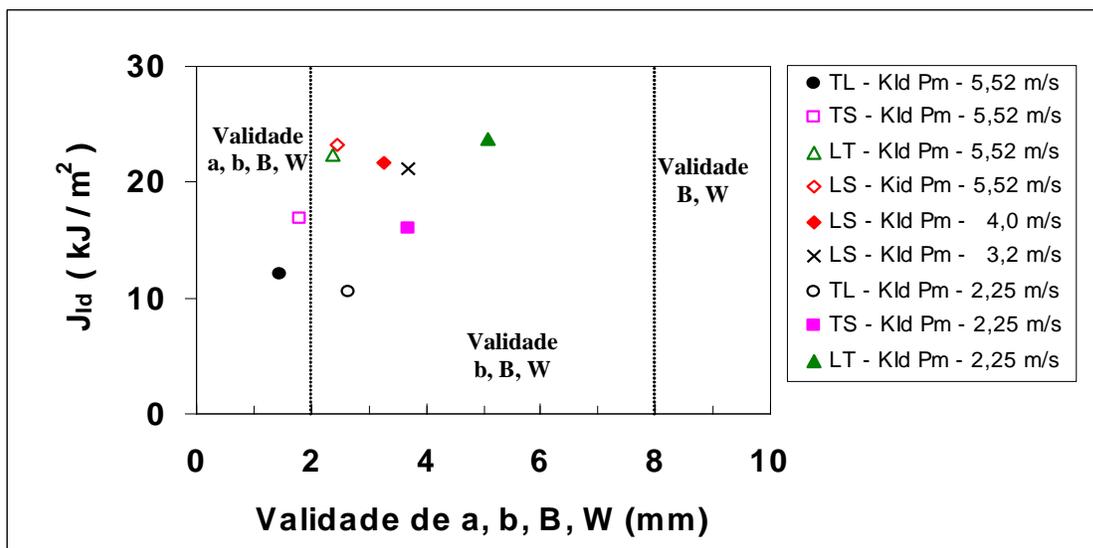


Figura 56 - Critério de validade dos resultados de K_{Id} , obtido por meio de valores da carga máxima, P_m , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.

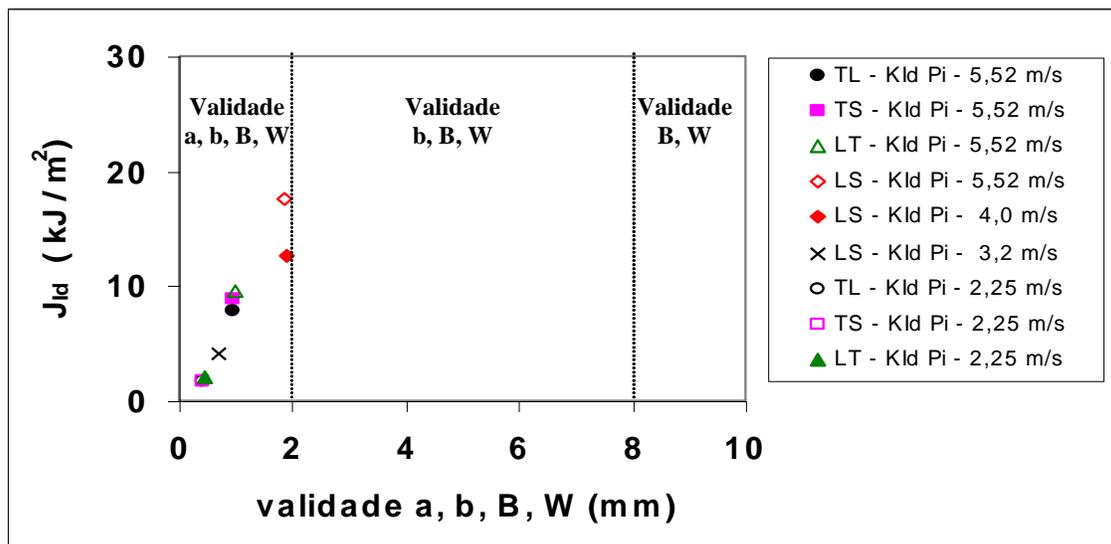


Figura 57 - Critério de validade dos resultados de K_{IId} , obtidos por meio de valores da carga de início de propagação de trinca, P_i , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.

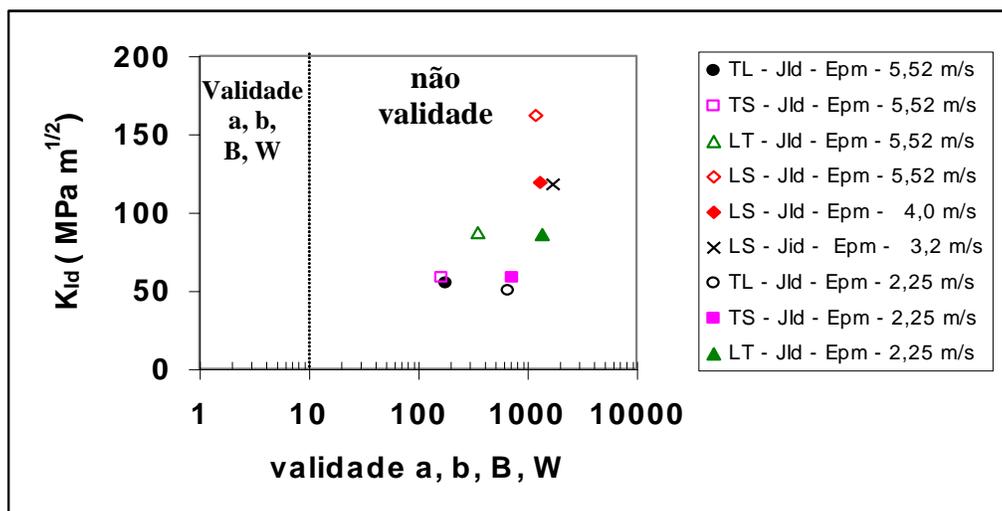


Figura 58 - Critério de validade dos resultados de K_{IId} , obtido de J_{IId} pelos valores da energia de carga máxima, E_{pm} , para as quatro orientações dos corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.

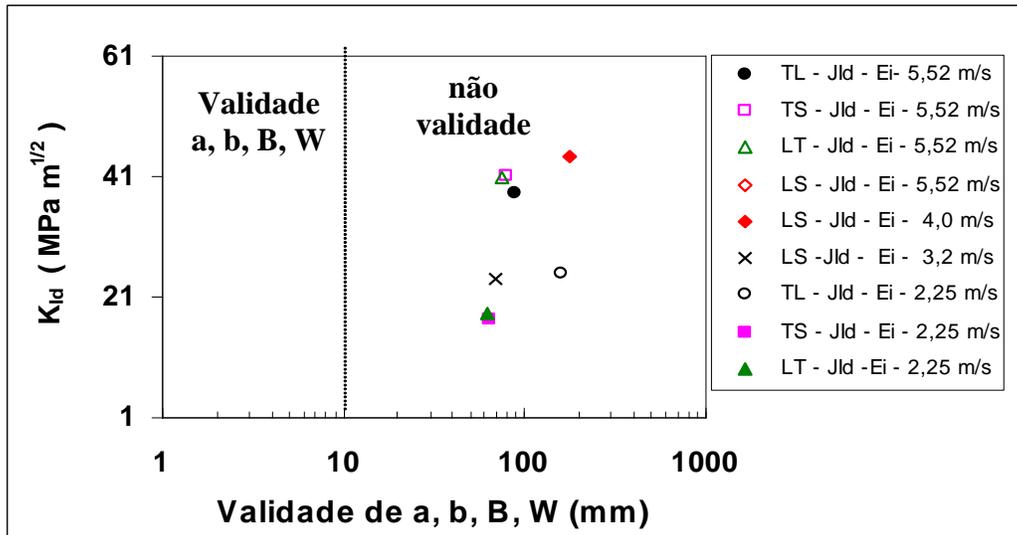


Figura 59 - Critério de validade dos resultados de K_{Id} , obtidos de J_{Id} , por meio dos resultados da energia de início de propagação de trinca, E_i , para as quatro orientações de corpos de prova e velocidades de carregamento segundo a norma ASTM E399.

5.10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA, K_{Id} , COM OS DE TENACIDADE À FRATURA QUASE ESTÁTICA, K_{Ic} .

A figura 60 apresenta todos os resultados de K_{Id} , obtidos por meio das expressões de J_{Id} , em função de E_i e E_{pm} (MFEP) e $4,67 P_i$ ou P_m (MFEL), e de K_{Ic} obtidos sob carregamento quase-estático [32]. Os valores de K_{Id} obtidos através de conceitos da MFEL apresentam-se mais conservativos do que os valores de K_{Id} obtidos utilizando-se conceitos da MFEP. Os maiores valores de K_{Id} foram obtidos pela energia de carga máxima, E_{pm} , apresentando um aumento considerável na orientação L-S, pois na energia de carga máxima

está contida também a energia de propagação. O aumento do parâmetro de tenacidade à fratura dinâmica segundo a seqüência das orientações T-L < T-S < L-T < L-S, indica que este fato ocorre devido ao aumento de ductilidade somada à resistência que a microestrutura, principalmente da orientação L-S, oferece à propagação da trinca.

Estima-se que os resultados de K_{Id} , obtidos por ensaios dinâmicos estão de acordo com os valores de K_{Ic} , obtidos por ensaios quase-estáticos nas orientações T-L e L-T. Porém, é importante ressaltar que não se pode comparar a validade dos resultados, em virtude das diferenças nos tamanho dos corpos de prova e das velocidades diferentes de ensaios.

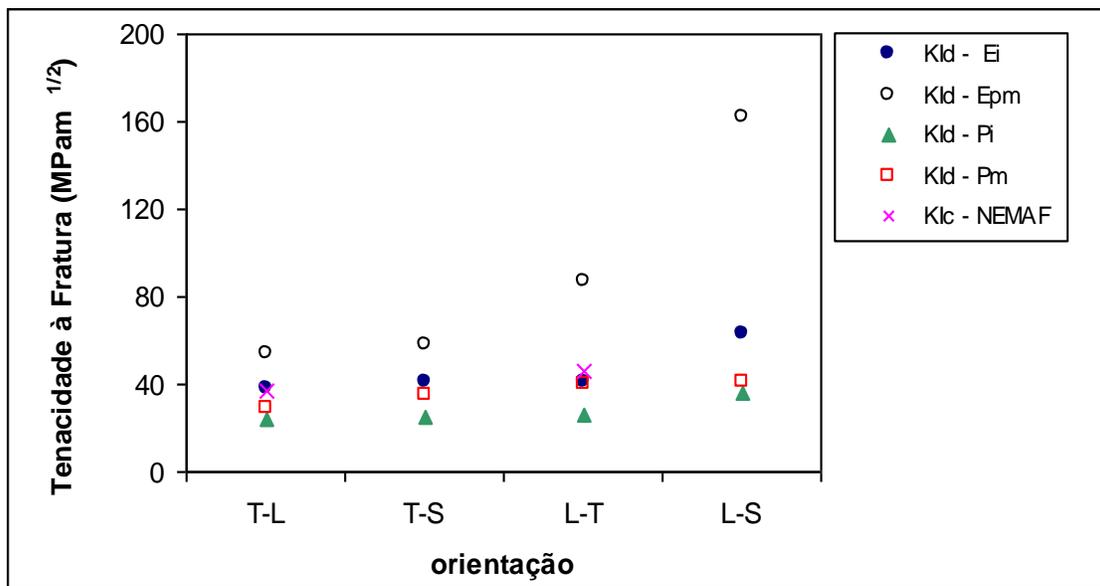


Figura 60 – Todos os valores obtidos de tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} e tenacidade à fratura estática, K_{Ic} , para as quatro orientações do corpo de prova.

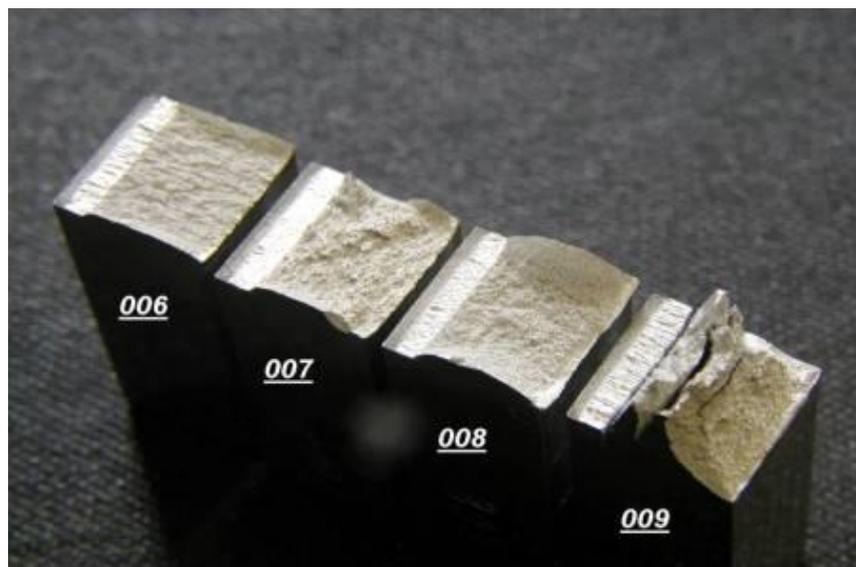
5.11 – ESTIMATIVA DA SUPERFÍCIE REAL DE FRATURA SOB IMPACTO

As figuras 61 a e 61 b mostram uma vista macroscópica das superfícies de fratura dos cdps rompidos por impacto, contendo entalhes e pré-trincas por fadiga, respectivamente. Observa-se que a orientação L-S (cdps 004 e 009) exhibe uma tortuosidade acentuada no caminho de fratura. A orientação T-S apresenta desvios menores que a L-S, porem significativamente superiores às orientações T-L e L-T. Pressupõe-se que a forte textura exibida pela placa laminada da liga de AL 7475-T7351 seja a responsável pela expressiva tortuosidade exibida pelas orientações T-S e L-S. Em ambas as orientações, a trinca é obrigada a percorrer uma trajetória que atravessa a espessura da placa. Nestes casos, mais especialmente na orientação L-S, observa-se a extensiva ocorrência de delaminações, operando como um mecanismo de propagação e ramificação de trincas que consome grande quantidade de energia. Esta parece ser a causa da alta tenacidade exibida pelos cdps entalhados e pré-trincados que foram extraídos segundo a orientação L-S. As orientações T-L, L-T apresentam caminhos de fratura similares, indicando o motivo pelo qual os valores obtidos na energia de propagação, E_p estarem próximos, conforme ilustrado na figura 34 no item 5.4.1.

As figuras 62 - 71 mostram o perfil do caminho da fratura dos cdps entalhados e pré-trincados nas diversas orientações dos corpos de prova, em posições respectivamente próximas à superfície lateral (a), $\frac{1}{4}$ da espessura (b) e no centro da espessura (c) dos cdps.



(a)



(b)

Figura 61 – Superfície de fratura dos corpos de prova entalhados (a) 001-T-L, 002-T-S, 003- L-T, 004-L-S e (b) pré-trincados 006-T-L, 007-T-S, 008-L-T, 009-L-S ensaiados na velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 2 X.

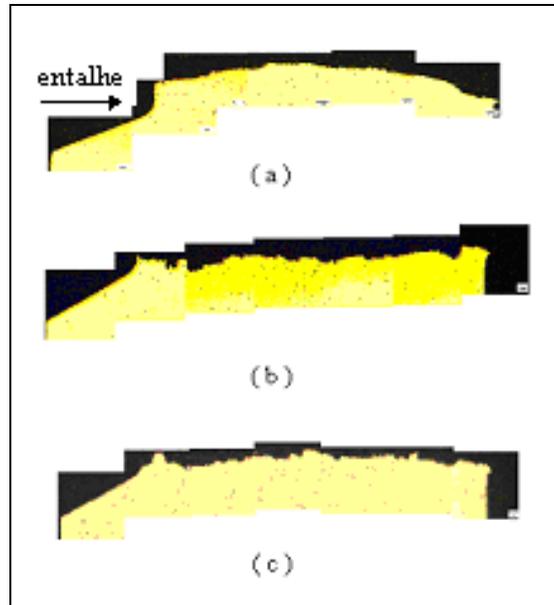


Figura 62 – Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 001 segundo a orientação T-L. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.

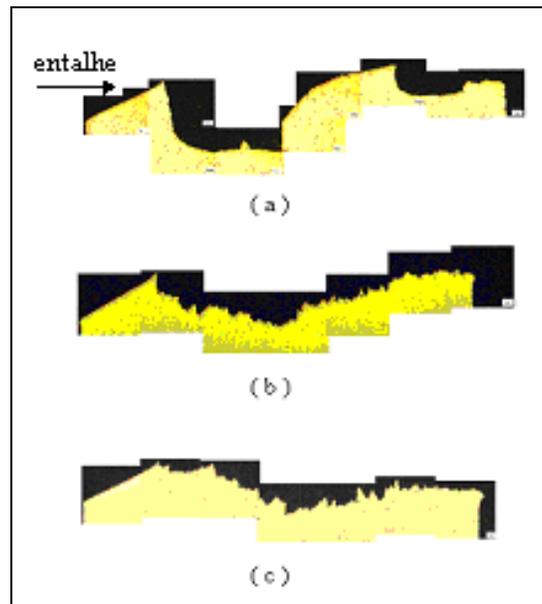


Figura 63 – Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 002 segundo a orientação T-S. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.

Observa-se a tendência ao desenvolvimento de delaminações, em especial na posição localizada próxima à superfície lateral do cdp (a).

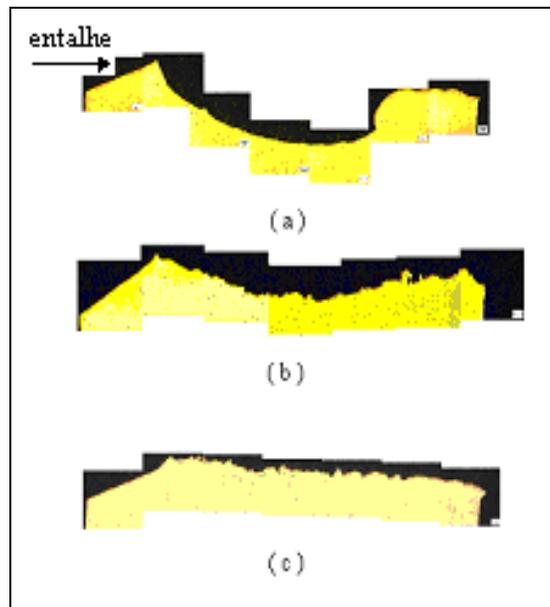


Figura 64 – Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 003 segundo a orientação L-T. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.

Pode ser facilmente notado o desenvolvimento de trincas de delaminação em todas as posições avaliadas na orientação L-S, conforme ilustra a figura 65. Isto explica o motivo da energia de propagação, E_p , ser superior à energia de carga máxima, E_{pm} , como foi mostrado na figura 34 no item 5.4.1.

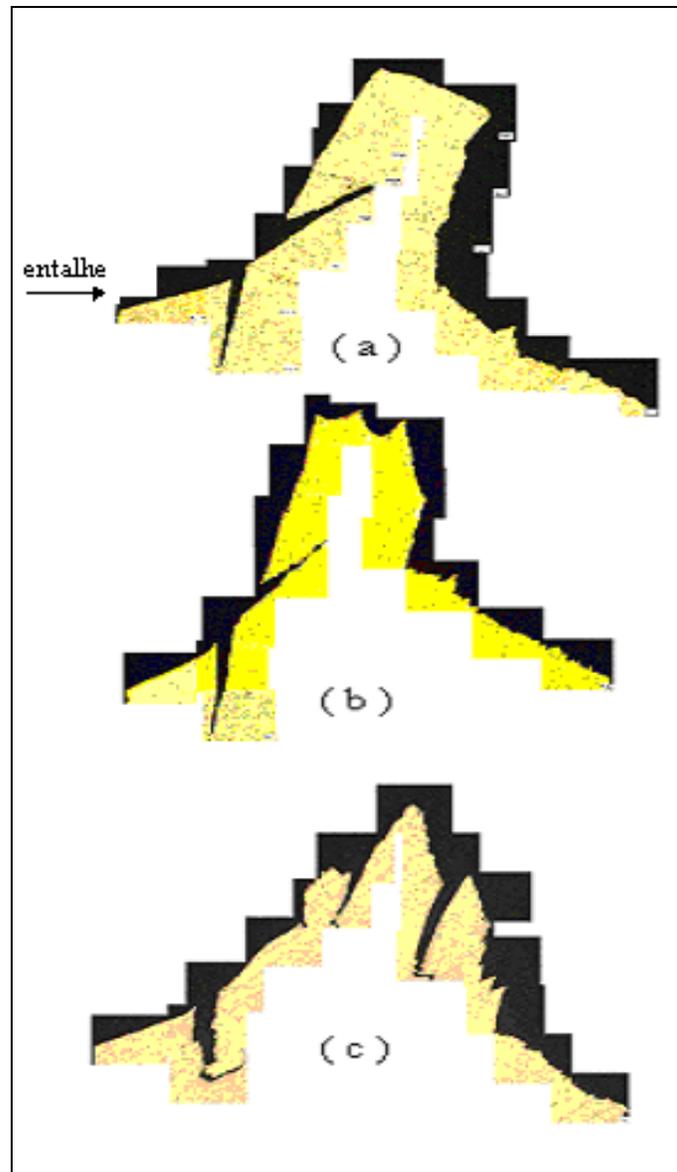


Figura 65 – Perfil do caminho da fratura do cdp entalhado 004 segundo a orientação L-S. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 7X

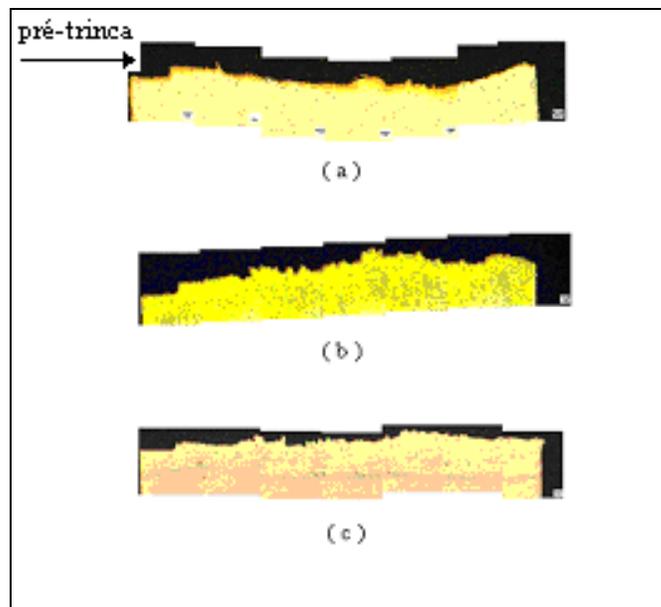


Figura 66- Perfil do caminho da fratura do cpd pré-trincado 006 segundo a orientação T-L. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.

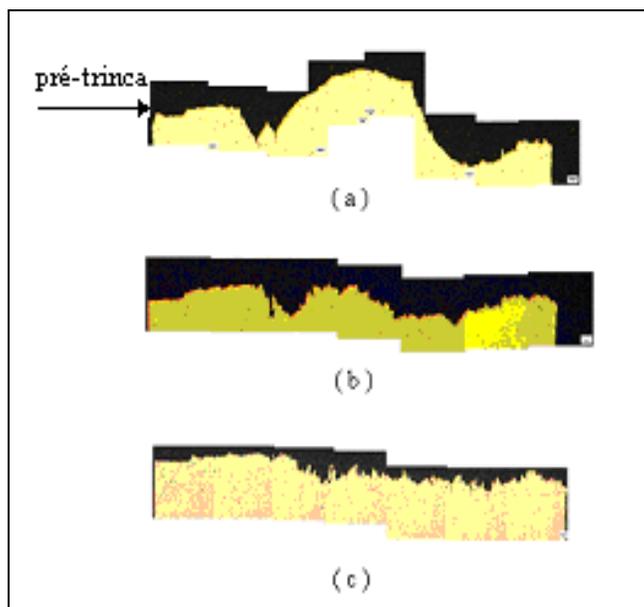


Figura 67 - Perfil do caminho da fratura do cpd pré-trincado 007 segundo a orientação T-S. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.

Observa-se a tendência para a ocorrência de delaminação, em especial na posição situada mais próxima à superfície lateral (livre) do cpd. 007.

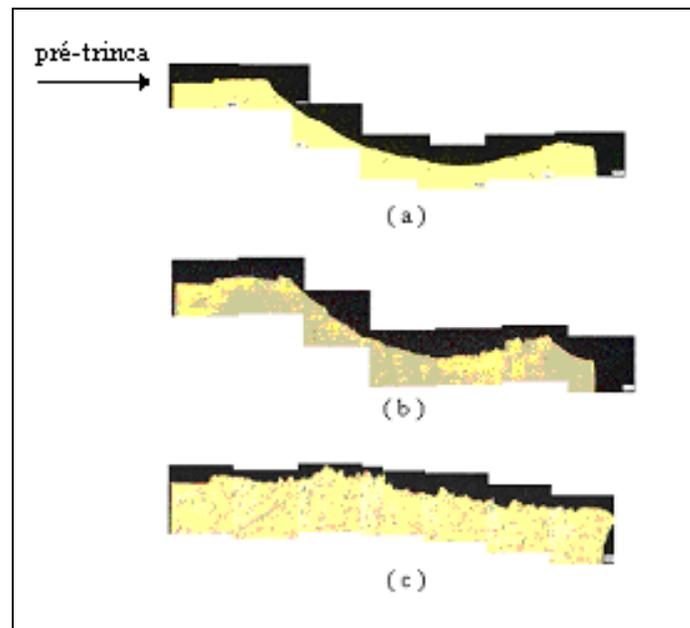


Figura 68 - Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 008 segundo a orientação L-T. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 5X.

As orientações T-L e L-T mostram semelhança no caminho percorrido pela trinca, tanto nos corpos de prova entalhados como nos pré-trincados, evidenciando que as energias de propagação, E_p , estão próximas para as duas direções. Porém o diferencial da tenacidade na orientação L-T, quando comparado com a orientação T-L, está na ductilidade que é expressa nos valores de energia de início de propagação da trinca, E_i .

Observa-se a ocorrência de delaminações ao lado de toda a espessura do cdp avaliado, conforme mostra a figura 69. O caminho percorrido pela trinca é semelhante ao já mostrado na figura 65, confirmando a resistência de propagação da trinca na microestrutura fortemente texturizada, no processo de fratura.

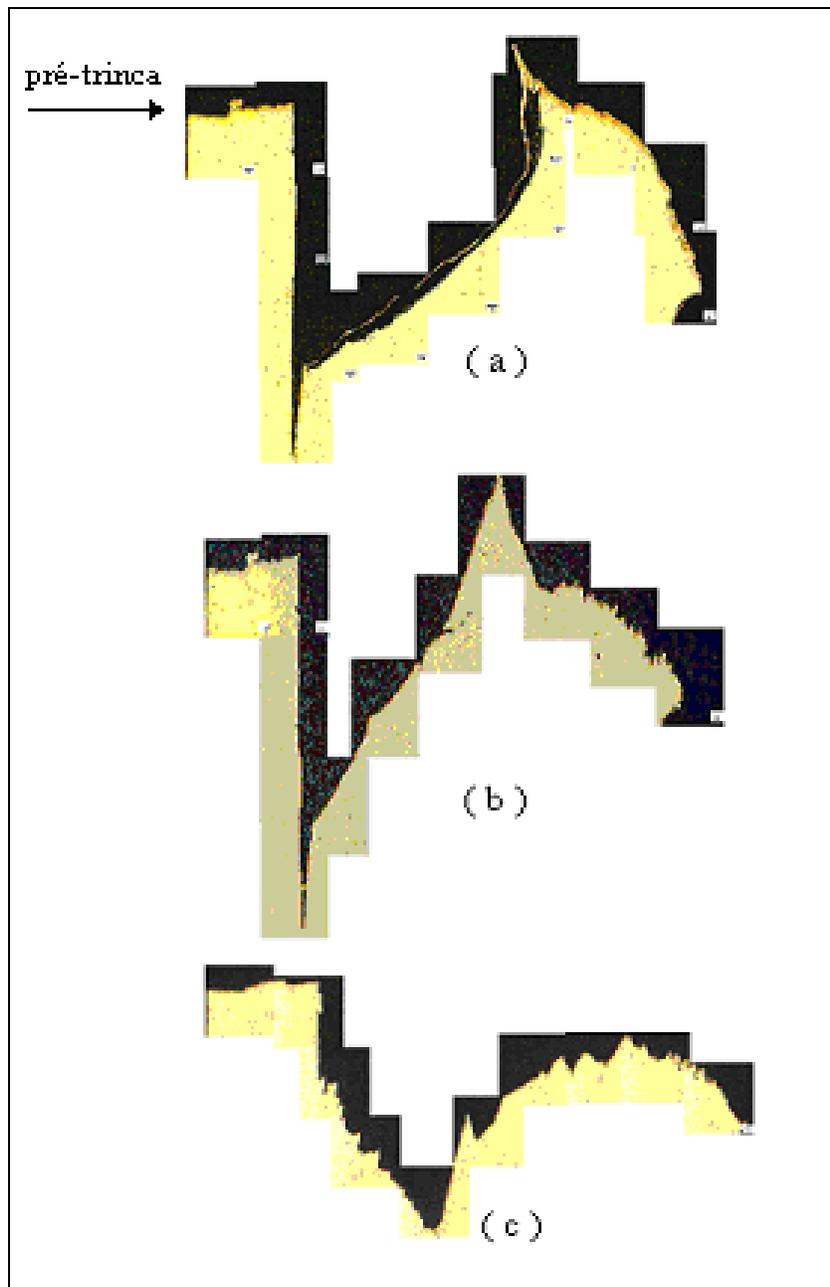


Figura 69 - Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 009, segundo a orientação L-S. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Aumento 7X.

Na figura 70 observa-se um menor grau de desenvolvimento de delaminações (exceto nas proximidades da pré-trinca), e maior planicidade do perfil de fratura relativamente à mesma orientação L-S do cdp ensaiado na taxa de carregamento 5,52 m/s, como mostra a figura 69.

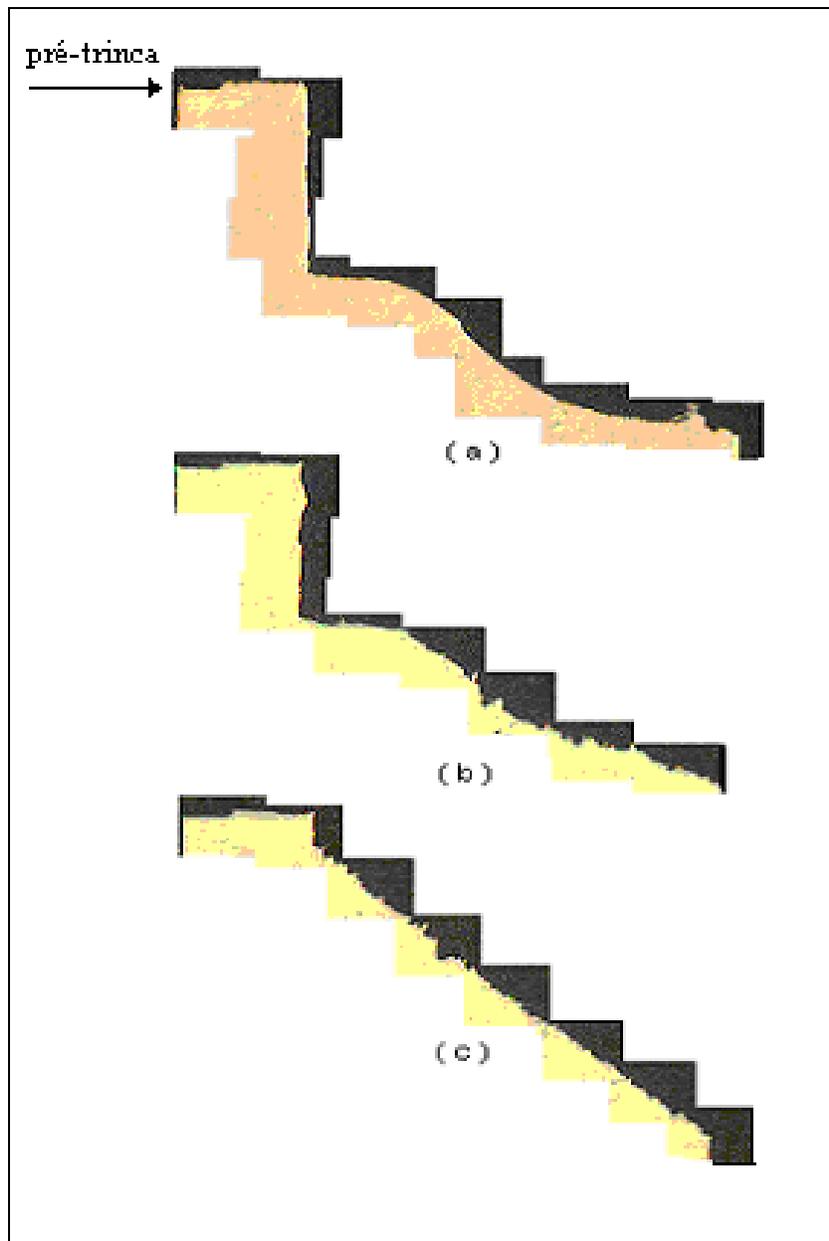


Figura 70 - Perfil do caminho da do cdp pré-trincado 093, segundo a orientação L-S. Velocidade de carregamento de 4,0 m/s. Aumento 7X.

Na figura 71 nota-se a existência de um menor nível de desenvolvimento de delaminações (exceto nas proximidades da pré trinca), e maior planicidade do perfil de fratura, relativamente à idêntica orientação L-S de um cdp ensaiado a taxas de carregamento de 5,52 m/s e 4,0 m/s.

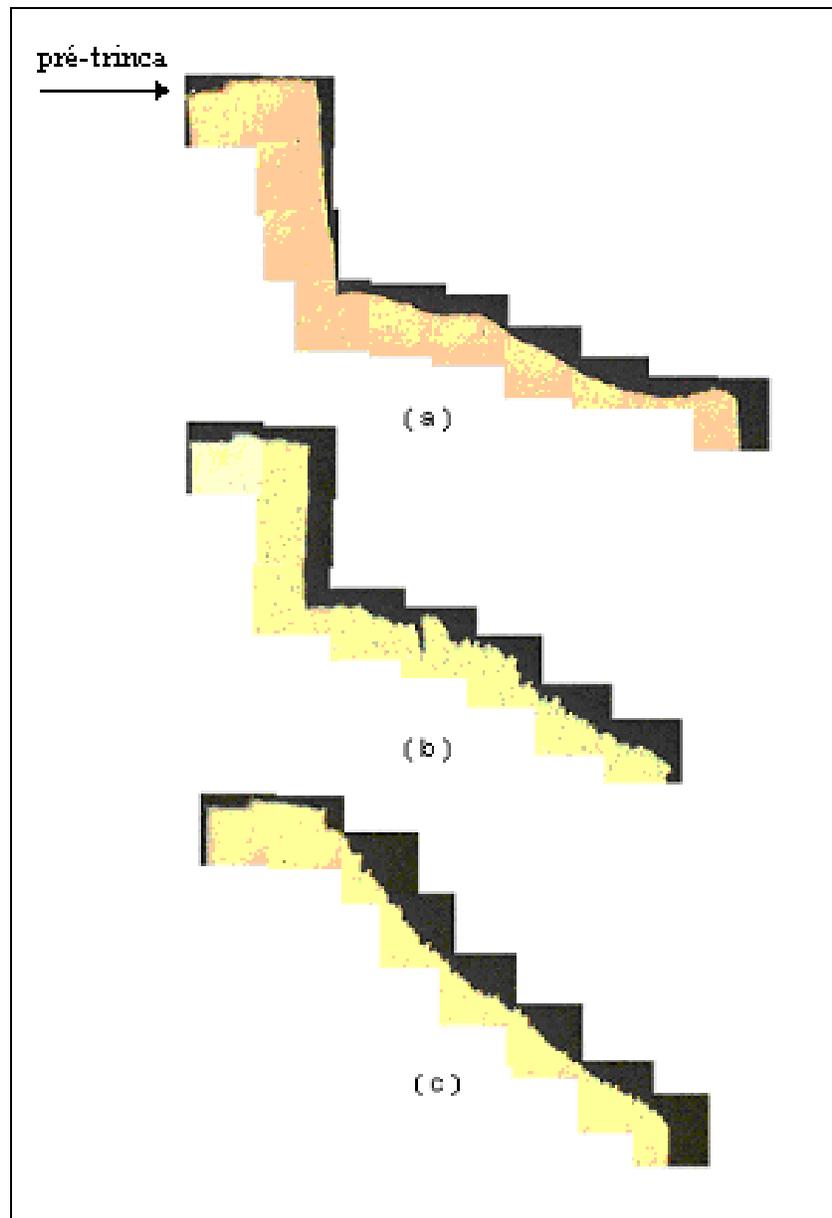


Figura 71 - Perfil do caminho da fratura do cdp pré-trincado 094, segundo a orientação L-S. Velocidade de carregamento de 3,2 m/s. Aumento 7X.

Por intermédio de um analisador computadorizado de imagens, foram feitas medidas da área verdadeira da superfície de fratura dos cdps entalhados e pré-trincados, ensaiados nas quatro orientações, na velocidade de carregamento de 5,52 m/s. Os resultados estão apresentados no Anexo C. Na figura 72 são colocadas as áreas de fraturas vs orientações.

Observa-se que a orientação L-S apresenta a maior área, seguida da T-S e as áreas das orientações T-L e L-T são próximas. Isto confirma que as orientações T-L e L-T apresentam área real de fratura muito próximas, tanto para os corpos de prova entalhados como para os pré-trincados. Estima-se que a microestrutura avaliada nestas orientações é a que contém a maior porcentagem de inclusões e fases intermetálicas, indicando que seja a responsável pela baixa resistência à propagação da trinca, quando comparada com as orientações T-S e L-S.

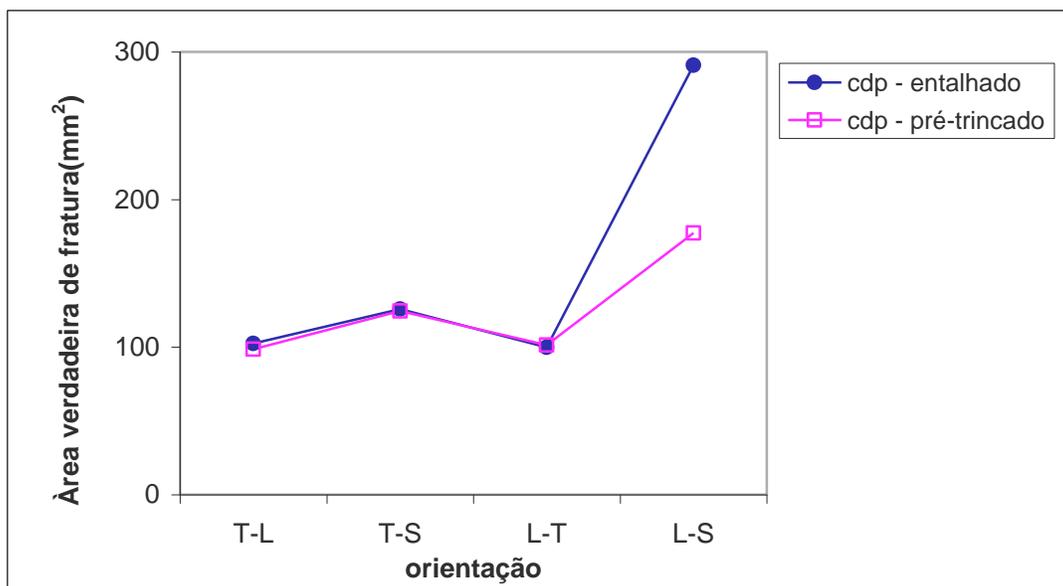


Figura 72 – Área verdadeira da superfície de fratura dos cdps entalhados e pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

A figura 73 mostra, para efeito comparativo, os valores de $J_{Id} - E_{pm}$ obtidos pelos valores utilizados da energia de carga máxima de fratura divididos pela área verdadeira de fratura, utilizando a expressão:

$$J_{Id} = \frac{2E_{pm}}{A_v}$$

e os valores de $J_{Id} - E_{pm}$ obtidos pela área convencional da fratura, pela expressão:

$$J_{Id} = \frac{2E_{pm}}{B(W - a)}$$

Assim, o valor de J calculado através da área verdadeira da fratura não tem sentido físico, como parâmetro de tenacidade à fratura. Este valor é utilizado no presente trabalho apenas como um parâmetro de comparação, visando determinar a viabilidade de se definir a energia específica de fratura (energia/por unidade de área), que seria um parâmetro intrínseco do material, independente da orientação do plano de fratura. Observa-se que os valores encontrados mostram um comportamento similar ao de J_{Id} calculado, levando-se em conta a área convencional, porém apresentando valores bem inferiores, como resultado da área de fratura verdadeira ser substancialmente maior que a convencional, notadamente para as orientações L-T e L-S.

Os valores de J_{Id} calculados pela área verdadeira da fratura são semelhantes, mas inferiores aos de $J_{Id} - E_{pm}$ obtido pela área convencional. Isto ocorre porque a área convencional é planar, enquanto que no cálculo da área verdadeira são computados o tamanho dos desvios sofridos pela ponta da trinca durante o processo de fratura. Nota-se que na orientação T-L, que apresentou caminho da fratura menos tortuoso, conforme mostrado na figura 66, os valores de J_{Id} encontrados são próximos. Porém, na orientação L-S, que apresentou um

caminho de fratura bastante tortuoso, como mostrado na figura 69, os valores distanciam-se significativamente.

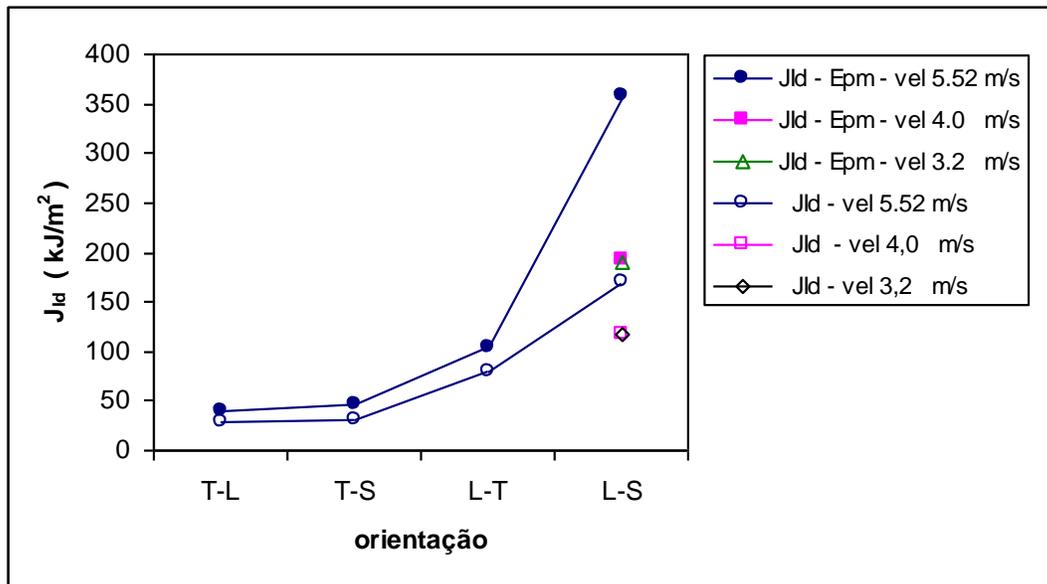


Figura 73 – Valores de J_{ld} obtidos pelas áreas convencional e área verdadeira dos corpos de prova pré-trincados. Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

O gráfico da figura 74 mostra os resultados das relações da energia total pelas áreas convencional e verdadeira da superfície de fratura de corpos de prova pré-trincados. Observa-se que nas orientações T-L, T-S, e L-T, estas relações são aproximadamente iguais. Entretanto, na orientação L-S, observa-se que esta relação decresce significativamente, quando se considera o cálculo da área verdadeira da fratura. Este comportamento, provavelmente, demonstra que se for utilizada uma técnica mais eficiente de medida do caminho da trinca, como observação por microscopia eletrônica de varredura, pode-se chegar a uma relação energia/área que independe da direção do plano de propagação da trinca. Ou seja, que esta relação seja uma propriedade intrínseca do material.

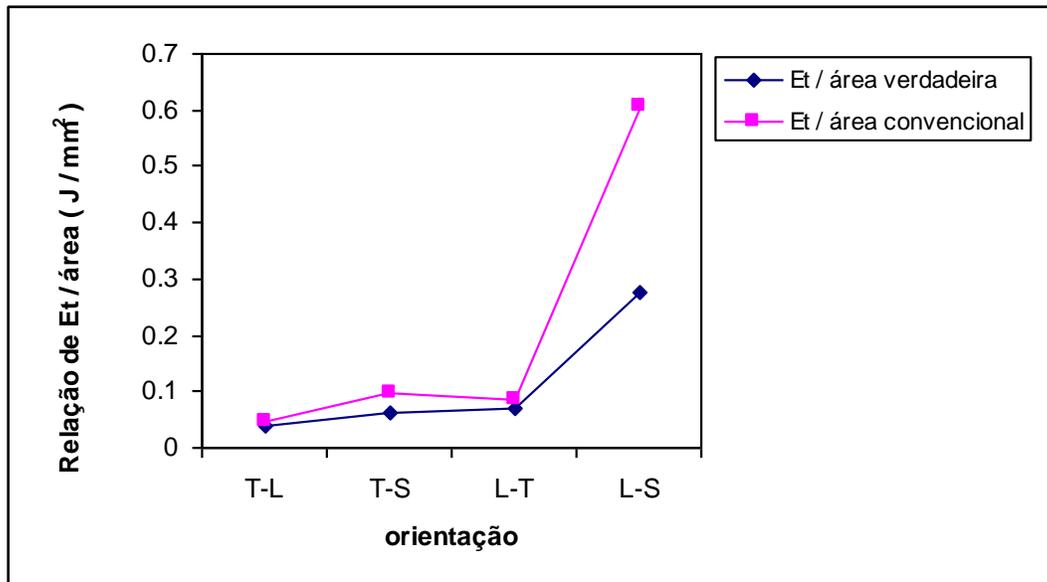


Figura 74 – Relação da energia total dividida pelas áreas convencional e verdadeira da superfície de fratura dos cdps entalhados e pré-trincados para as quatro orientações.

6 - CONCLUSÕES

O parâmetro K_{Id} obtido pela Mecânica da Fratura Elástica Linear e J_{Id} pela Mecânica da Fratura Elasto-Plástica apresentaram uma tendência de aumento segundo as seqüências de orientações $T-L < T-S < L-T < L-S$.

Os valores de J_{Id} nas quatro orientações analisados pelo critério de validade da norma ASTM E1820, mostraram que o material do presente estudo apresenta comportamento dúctil, portanto pode ser caracterizado pelo parâmetro de tenacidade à fratura da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica.

Observou-se a forte influência da microestrutura existente nas várias orientações de propagação na propriedade de tenacidade à fratura dinâmica, evidenciada pela orientação L-S, indicando que a máxima tenacidade alcançada deve-se a microestrutura ter apresentado boa resistência e ductilidade.

Os resultados indicam a importância do estabelecimento de critérios adequados para a confecção de estruturas e componentes de engenharia de alta responsabilidade a partir de placas trabalhadas mecanicamente que apresentam forte texturização da microestrutura.

Os valores obtidos de J_{Id} pela energia de início de propagação da trinca, E_i , por meio do método da taxa de variação da flexibilidade elástica, foram validados pela norma ASTM E1820 indicando que a metodologia proposta por Kobayashi [23] pode ser seguramente aplicada para o material do presente estudo.

Observou-se que quanto maior a velocidade de carregamento por impacto maior é a tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástica nas orientações T-L, T-S, L-T e L-S de carregamento.

Foi observado nas orientações T-L e L-T que os valores dos parâmetros de K_{Id} são menores dos valores de K_{Ic} , porém, próximos.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o critério de validade dos resultados de J_{Id} e K_{Id} variando-se a relação a/W dos corpos de prova Charpy.
- Estudo da correlação dos valores de K_{Id} com os de K_{Ic} para as orientações L-T e L-S
- Verificar a possibilidade da determinação, com maior precisão, da área real da superfície de fratura dos corpos de prova utilizando-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

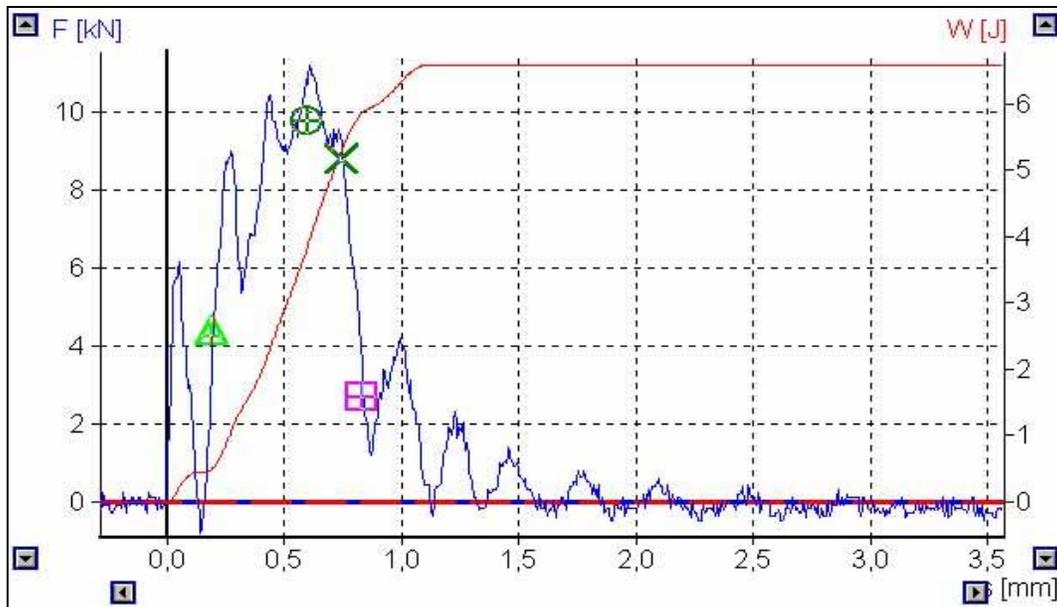
- [1] AZEVEDO, C.R.F.; HIPPERT JR, E.. *Fracture of an aircraft's Landing gear*. Engineering Failure Analysis, p. 265-275, 2002.
- [2] AZEVEDO, C.R.F.; HIPPERT JR, E ; ESPERA, G.; GERARDI, P. *Aircraft landing gear failure: fracture of the outer cylinder lugr*. Engineering Failure Analysis, p.1-15, 2002.
- [3] OWEN. D. M., et al. *Experimental determination of dynamic crack initiation and propagation fracture toughness in thin aluminum sheets*, International Journal of Fracture, vol.45, p.1-15,1998.
- [4] MEGUID, T. *Engineering Fracture Mechanics*. Elsevier Applied Science,1989.
- [5] ASKELAND, D. R. *The Science and Engineering of Materials*. PWS Publishing Company, 3rd edition, 1994.
- [6] DIETER, G.E. in: *Metalurgia Mecânica*. 2^a Ed. Trad. Silva, A.S.S; Almeida, L.H. e Miranda, P.E.V., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, p.419-50, 1981.
- [7] CETLIN P. R; SILVA P. S. P. *Análise de fraturas*, Associação Brasileira de Metal, 2 ed p. 5 -63, 1979
- [8] ASTM E1823. *Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. Annual Book of ASTM Standards, p. 1034-1040, 1996.
- [9] ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications*. 2ed. Boca Raton. CRC press, 688 p.,1995.
- [10]TARPANI, J. R. *Avaliação da Estabilidade de Trincas em Componentes Estruturais por Meio do Parâmetro Elasto-Plástico Integral – J e Comparados com Resultados Obtidos Via Mecânica da Fratura Elástica-Linear*. São Carlos, 1995. p. 174. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.Brasil.
- [11] TOKIMATSU R. C; FERREIRA I. *Ensaio Charpy- Limitações e Campo de Aplicações*. Anais 54º Congresso da ABM-(Cd-Rom), São Paulo, 25 a 29 de junho,1999.

- [12] ASTM E23. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Annual Book of ASTM Standards, p. 1-20, 1997.
- [13] ASM-Metals Handbook. *Toughness and Fracture Mechanics, in: Failure Analysis and Prevention*. v.10, 8^a ed., Metals Park, Ohio. p.30-44,1975.
- [14] DELFORGE, D.Y.M; TOKIMATSU,R.C; FERREIRA, I. in: *Anais do I Seminário de Mecânica da Fratura* . p. 325-344. Ouro Preto-MG, junho/ 1995.
- [15] RODRIGUES, A. R; TOKIMATSU, R.C. *Determinação da Tenacidade à Fratura Dinâmica Aparente da Liga de Alumínio AI7050 por meio do Ensaio Charpy Instrumentado Utilizando diferentes Transdutores*. COBEM 2001, Material Science, vol 2, p. 224-232.
- [16] IVANKOVIC, A. and WILLIAMS, J. G. *The finite volume analysis of linear elastic dynamic fracture problems*. Dynamic Fracture Mechanics. Editor: M. H. Aliabali, Computational mechanics publications, p. 101-135, 1995.
- [17] YAMAMOTO, I.; KOBAYASHI, T. *Evaluation Method of Dynamic Fracture Toughness by the Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing System*. International Journal Pres. Ves. Piping, vol.55, p. 295-312, 1993.
- [18] Reference Manual – *Software. Instron Wolpert Software for Instrumented Pendulum Impact Testing Machines*.1999.
- [19] KOBAYASHI, T; YAMAMOTO, I; NIINOMI, M. *Introduction of a new dynamic fracture toughness evaluation system*, Journal of Testing and Evaluation, v.21, n.3, p.145-53, 1993.
- [20] ZHU, L.H.; ZHAO, Q. X. ; GU, H. C. AND LU, Y. S. *Application of instrumented impact test for studying dynamic fracture property of 9Cr-1Mo-V-Nb-N steel*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 64, p. 327-336, 1999.
- [21] KOBAYASHI, T.; YAMAMOTO, I.; NIINOMI, 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.
- [22] ANGAMUTHU, K.;GUHA, B.; Abd ACHAR, D. R. G. *Investigation of dynamic fracture toughness (J_{Id}) behavior of strength mis-matched Q & T steel weldments using instrumented Charpy impact testing*. Engineering Fracture Mechanics. vol. 64, p. 417-432, 1999.

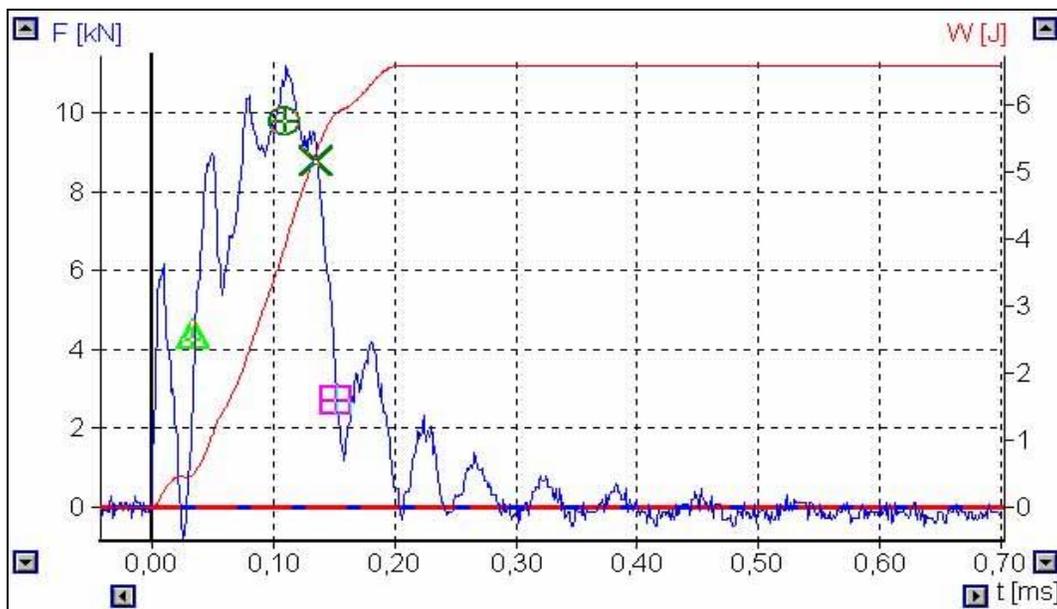
- [23] KOBAYASHI, T. *Analysis of impact properties of A533 steel for nuclear reactor pressure vessel by instrumented charpy test*. Engineering Fracture Mechanics, vol.19, n. 1, p. 49-65,1984.
- [24] BANK,S.M.; PARK,M. K. AND SUN,D. J. *Dynamic Fracture Characteristics of Metallic Materials under Impact Loading*. Key Engineering Materials Vols. 145-149. p 261-66,1998.
- [25] ZHU, L.H.; ZHAO, Q. X. ; GU, H. C. AND LU, Y. S. *Application of instrumented impact test for studying dynamic fracture property of 9Cr-1Mo-V-Nb-N steel*. Engineering Fracture Mechanics, 64. p. 327-336, 1999.
- [26] PEROSANZ F. J. et al. *Cálculo de la tenacidad de fractura através de ensayos dinámicos*. Revista Metalúrgica, v.33. p.399-405,1998).
- [27] ASTM E1820. *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. Annual Book of ASTM Standards. 1997.
- [28] SAE AMS 4202 C. *Aerospace Material Specification for Aluminum Alloy Plates*. The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. 2002.
- [29] NISHIOKA, T. *Recent developments in computational dynamic , Dynamic Fracture Mechanicals*. Editor: M. H. Aliaabadi, Computational Mechanics Publications, p. 1 – 60,1995.
- [30] Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards, Section 3, v. 03.01, Designation E399-90, p. 485-515, 1991.
- [31] ASTM E1245. *Standard Practice for Determining the Inclusion on Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis*.1995.
- [32] Ruckert, C.O.F. *Correlação de estrias de Fadiga com Espectro de Cargas em Liga de Alumínio Aeronáutica SAE AMS 7475 T7351*. São Carlos, 2003. p. 130. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.Brasil.
- [32] ZHANG, X. P.; SHI, Y. W. *Constraint of Side-Groove and Its Influence on Fracture Toughness Parameter in Charpy-Size Specimens*. Engineering Fracture Mechanics, v.43, p.863-867, 1992.
- [33] ASM – Metals Handbook . *Identification of Types of Failures, in: Failure Analysis and Prevention*, v.11, 9 ed, Metals Park, Ohio, fifth printer, p. 75-81,1995.

- [34] ZHANG, X. P.; SHI, Y. W. *Comparative studies of several methods to determine the dynamic fracture toughness of a nuclear pressure vessel steel A508 CL3 with Charpy-size specimen*. International Journal of Fracture, vol.81, p. 195-204, 1996.

9 - ANEXO A - SINAIS SEM TRATAMENTOS GERADOS PELO EQUIPAMENTO

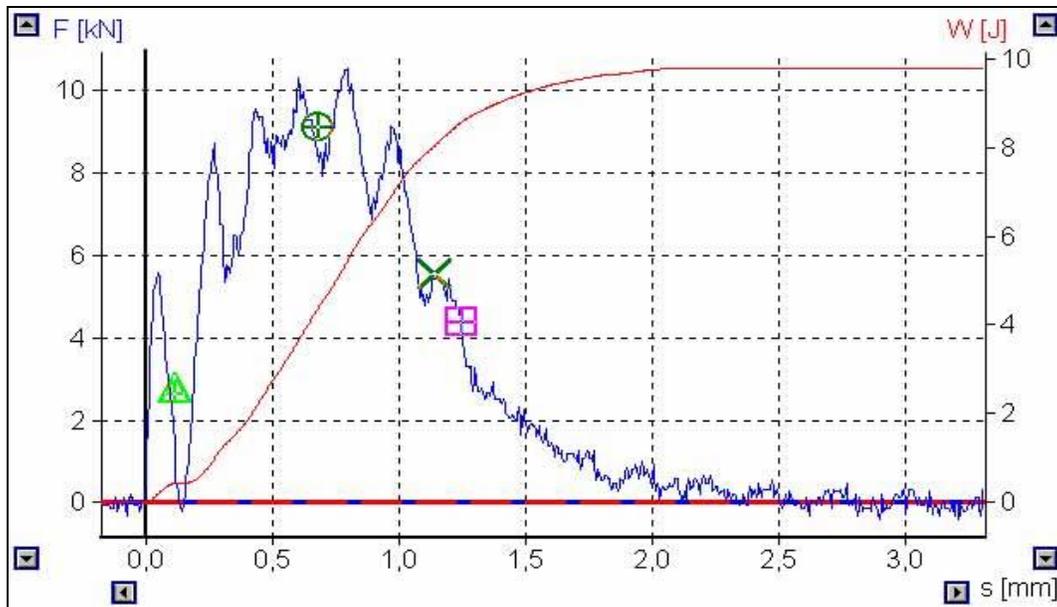


(a)

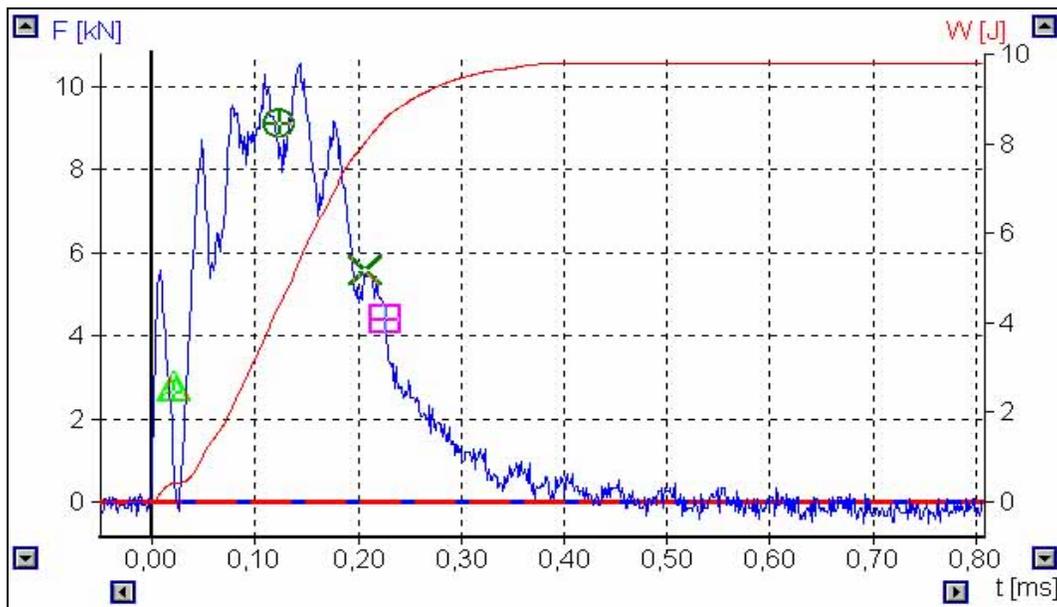


(b)

Figura A1 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b).carga-tempo-energia do cdp - entalhado - 001 (orientação T-L), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).

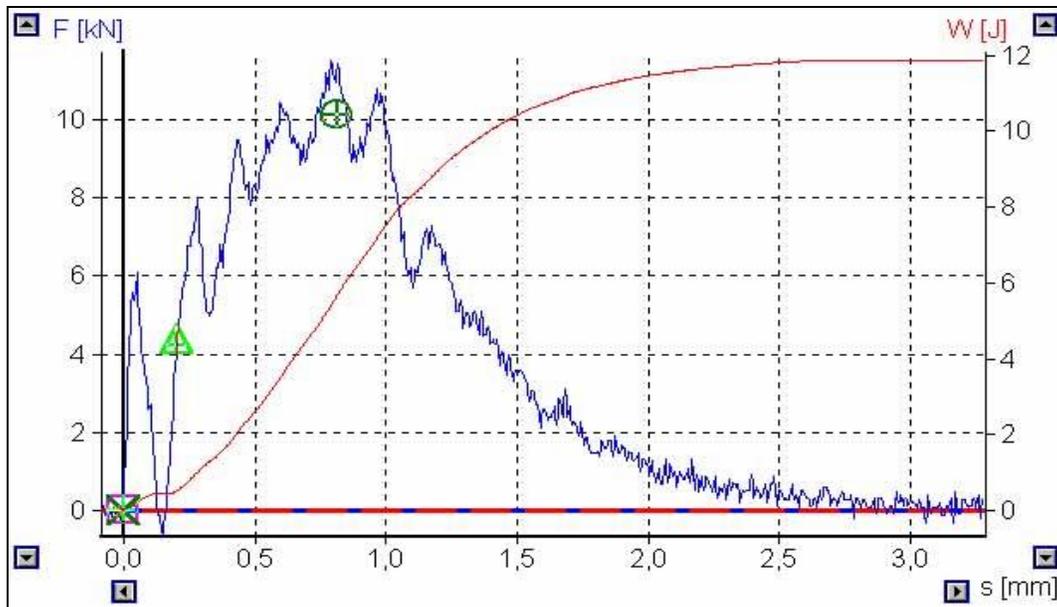


(a)

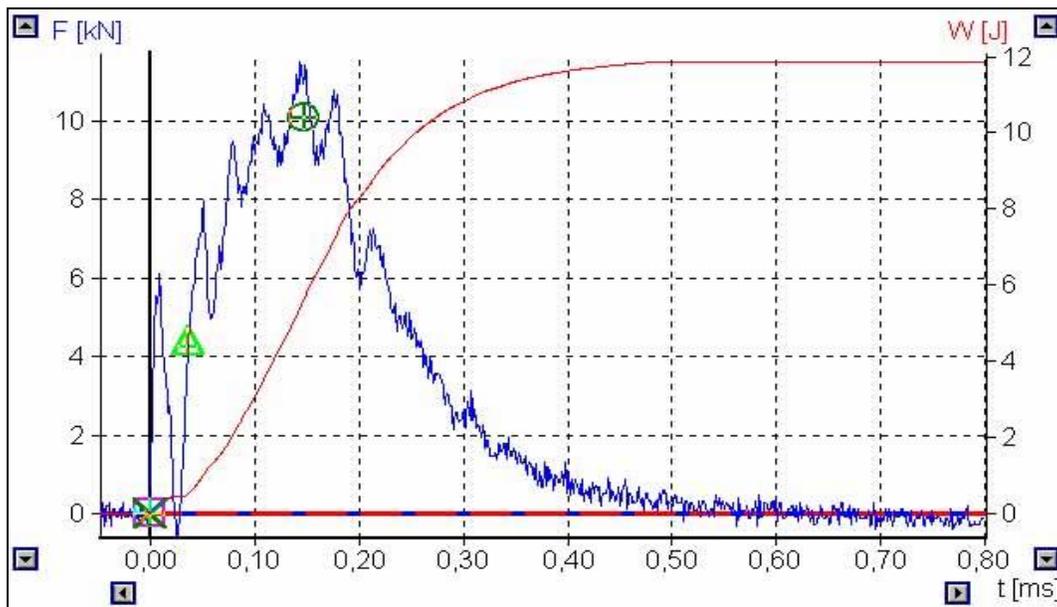


(b)

Figura A2– (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - entalhado - 002 (orientação T-S), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).

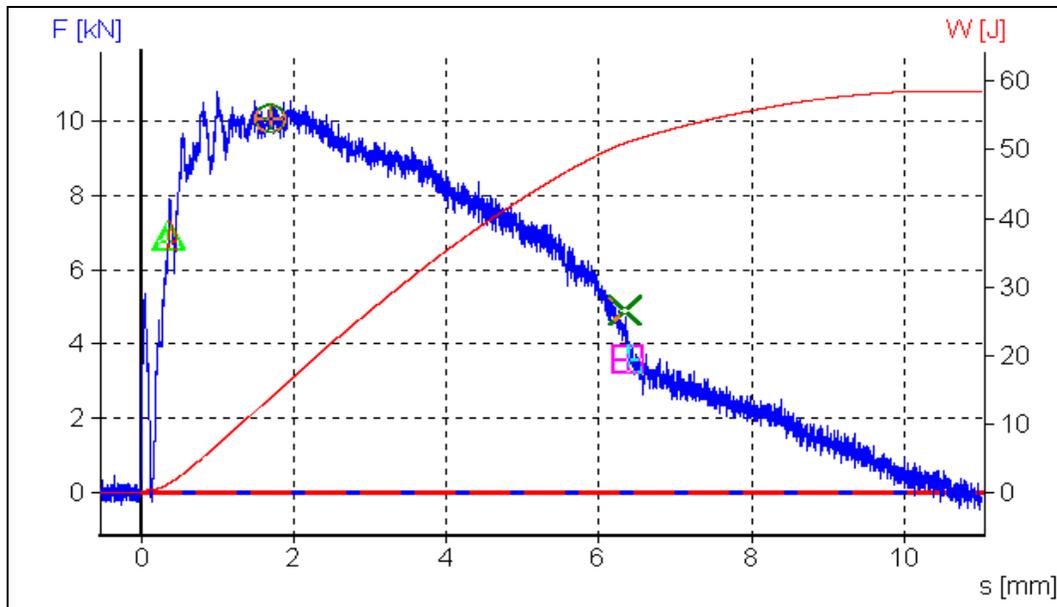


(a)

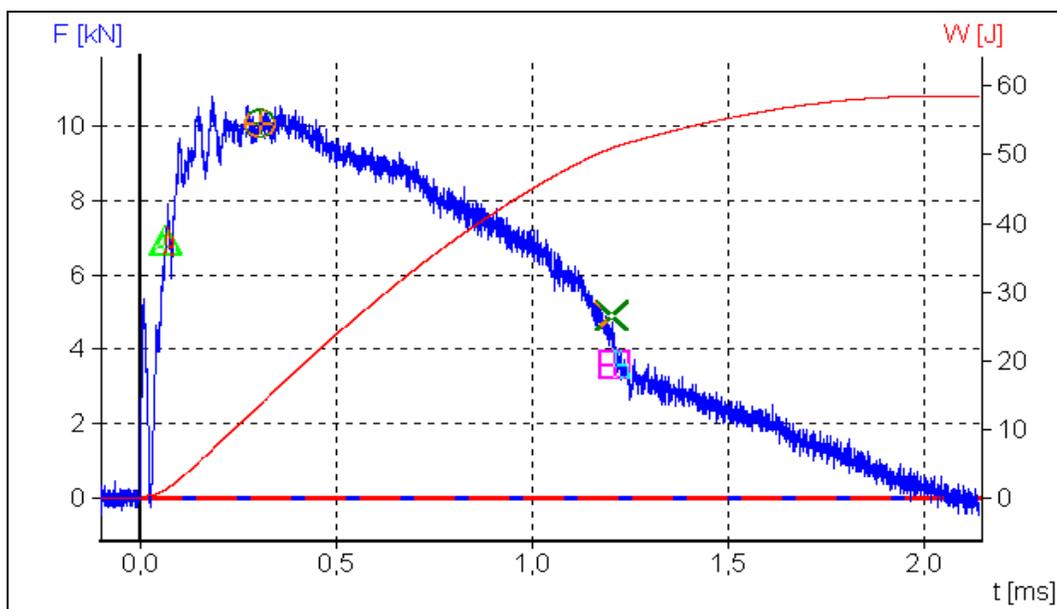


(b)

Figura A3– (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - entalhado - 003 (orientação L-T), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).

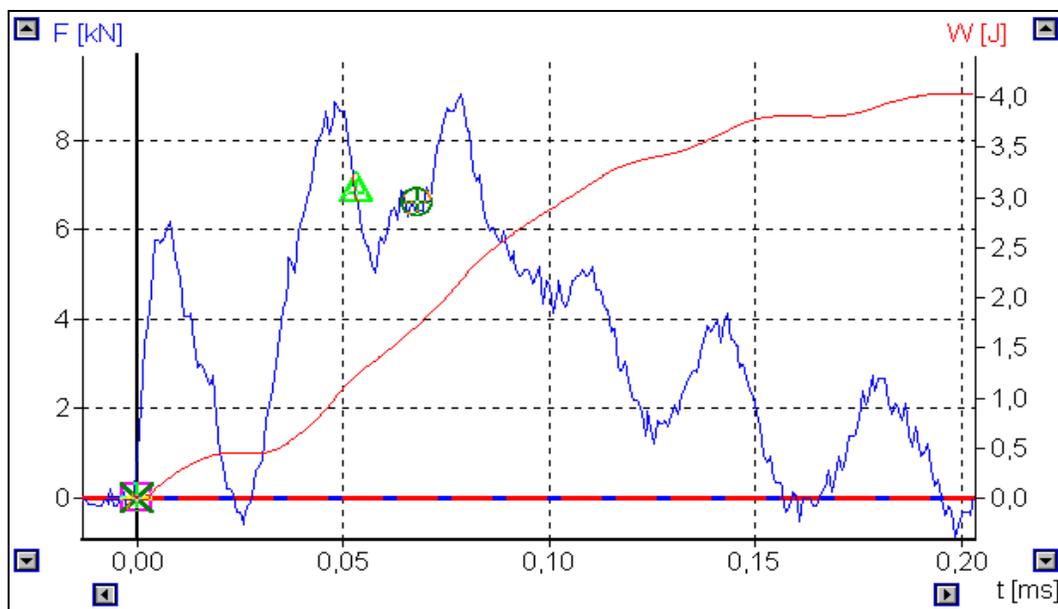


(a)

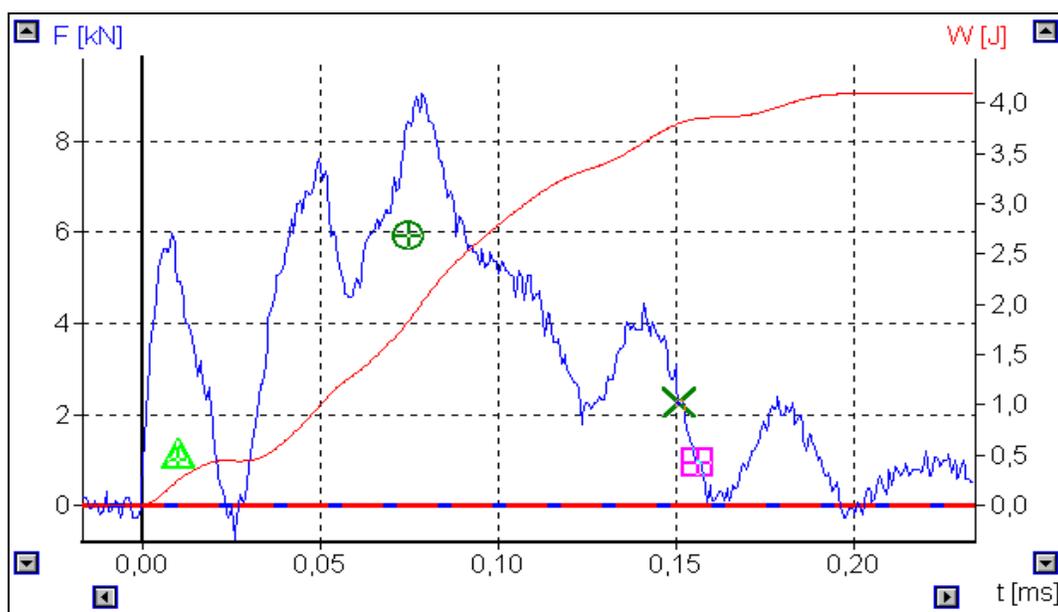


(b)

Figura A4 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b).carga-tempo-energia do cdp - entalhado - 004 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).

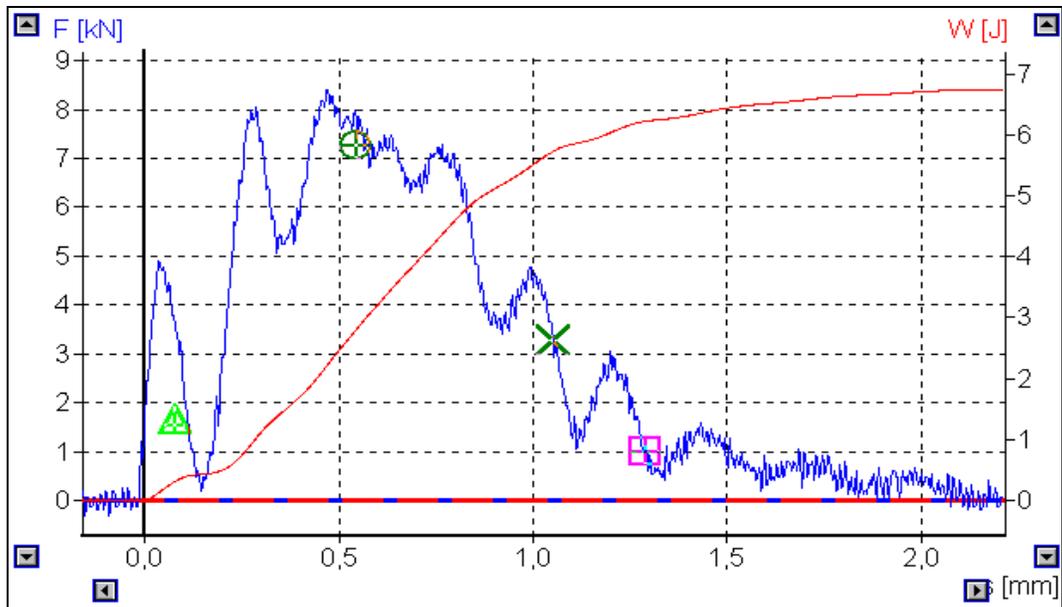


(a)

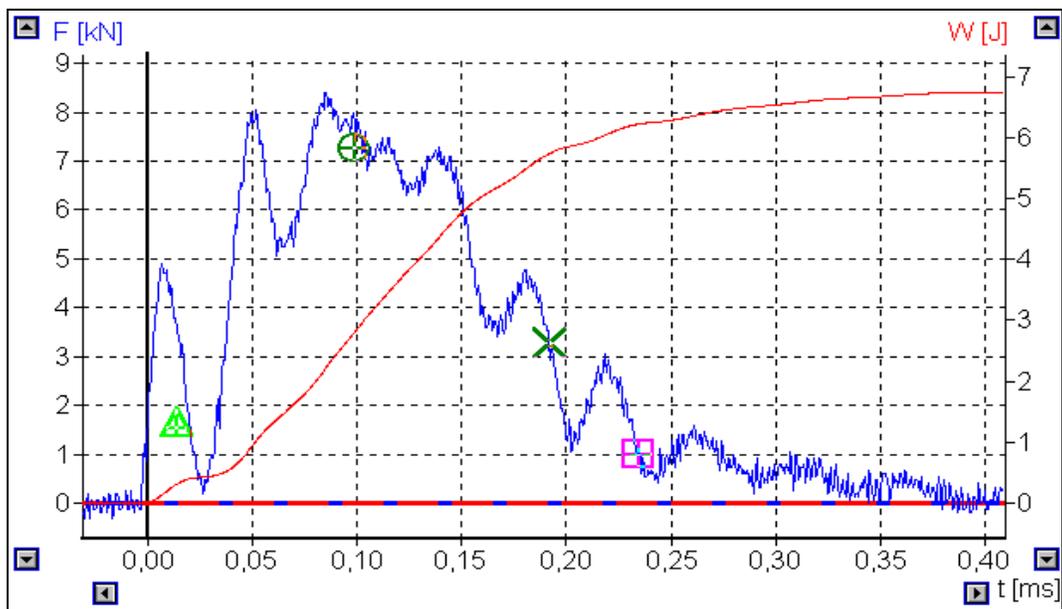


(b)

Figura A5 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - pré-trincado - 006 (orientação T-L), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).

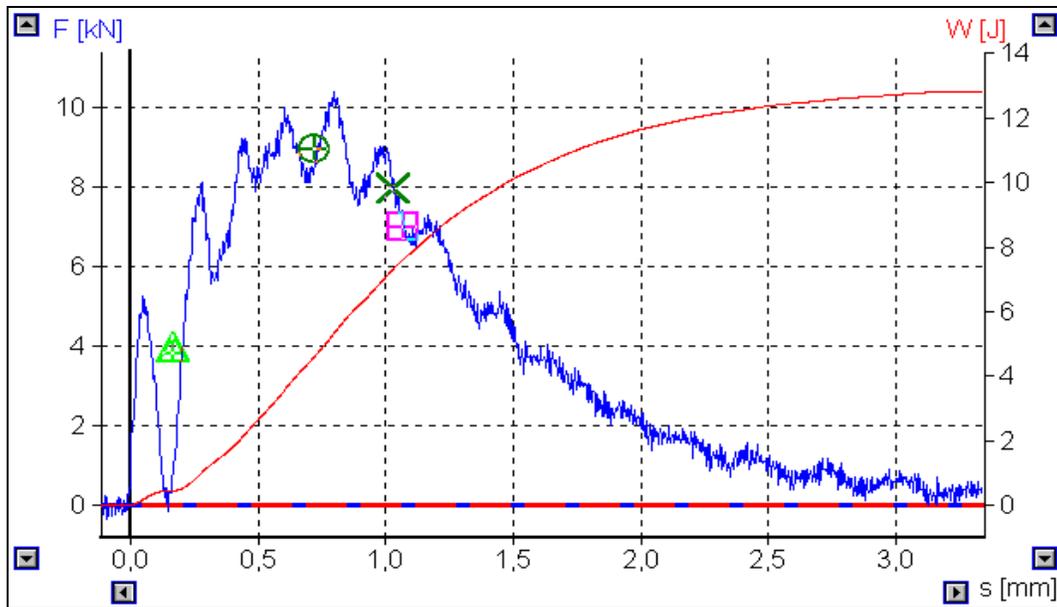


(a)

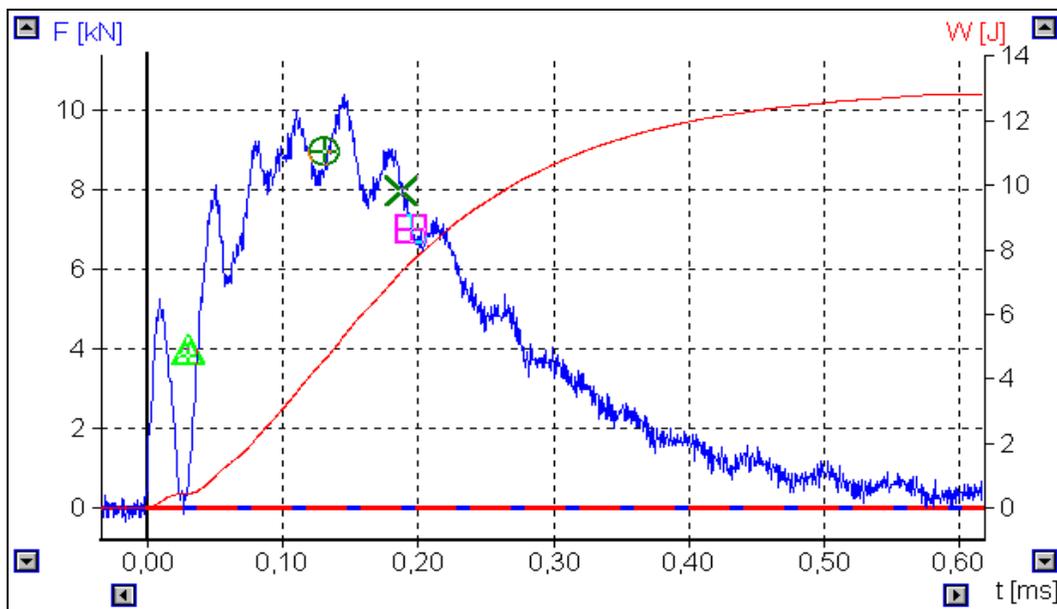


(b)

Figura A6 –(a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - pré-trincado - 007 (orientação T-S), velocidade de carregamento 5,52 m/s, (300 J).

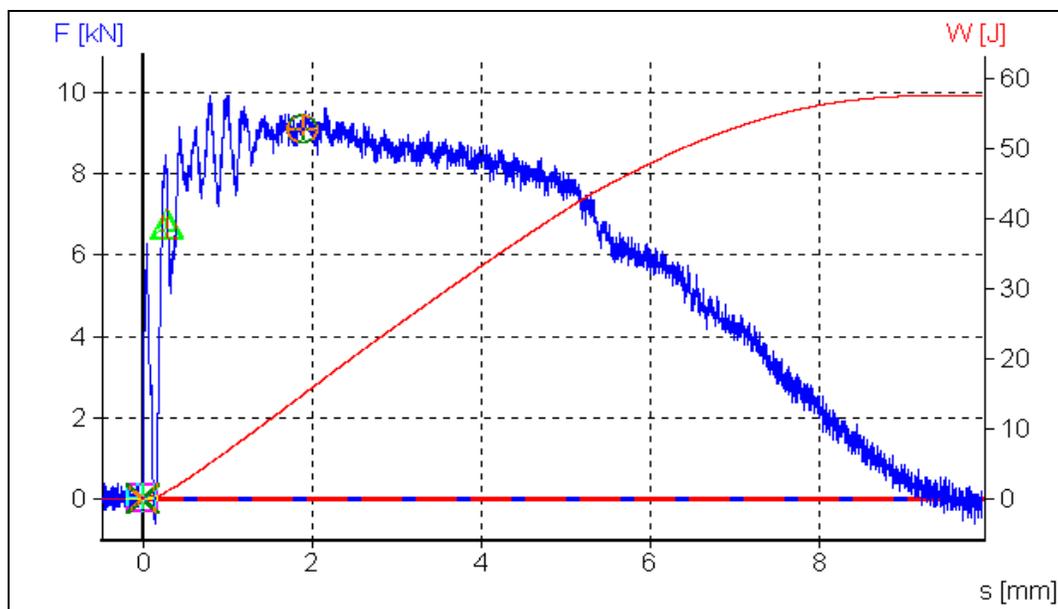


(a)

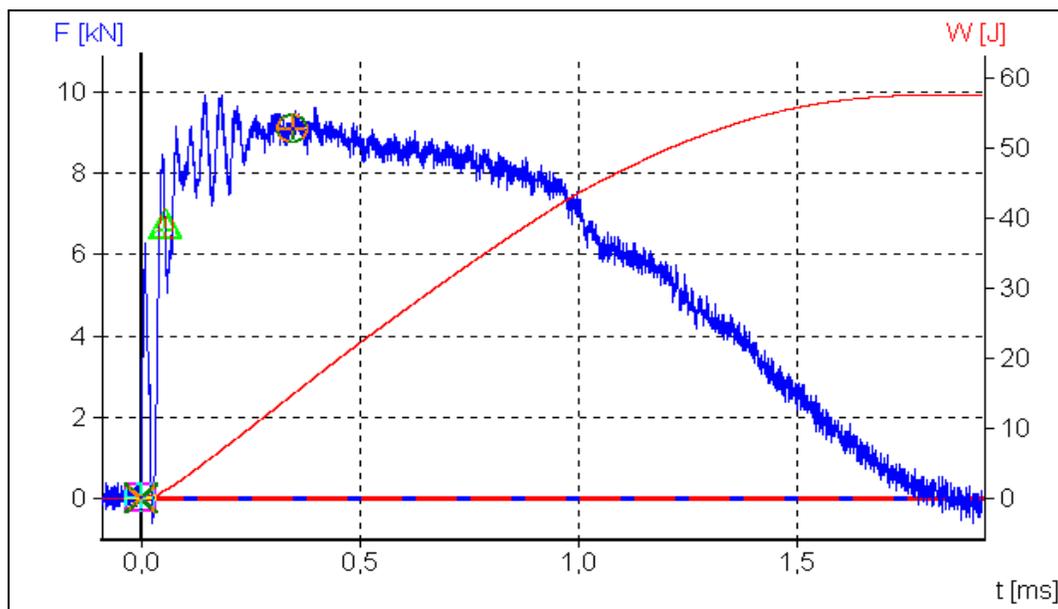


(b)

Figura A7 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - pré-trincado - 008 (orientação L-T), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J)

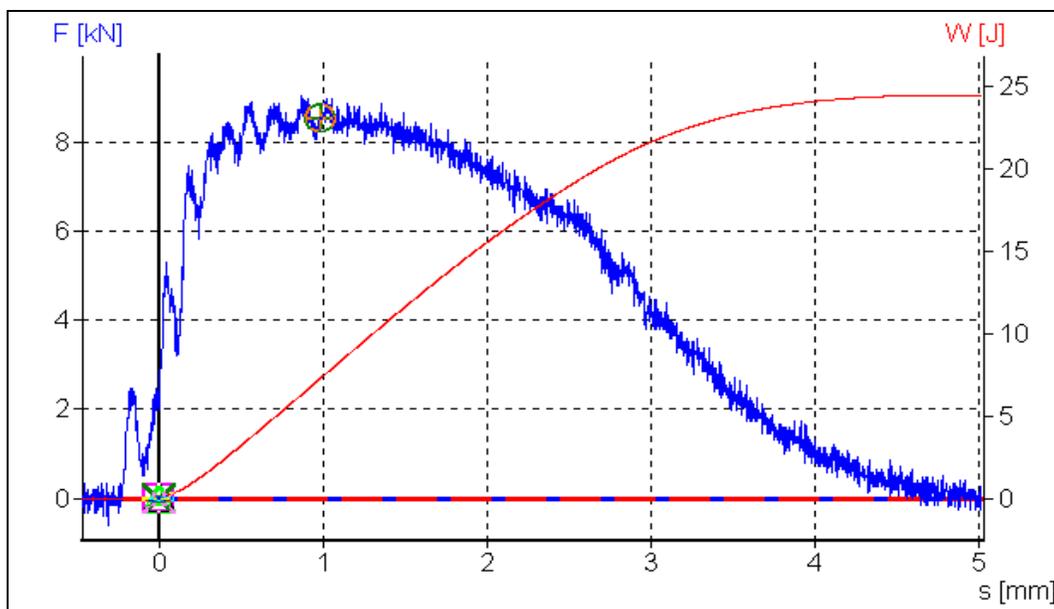


(a)

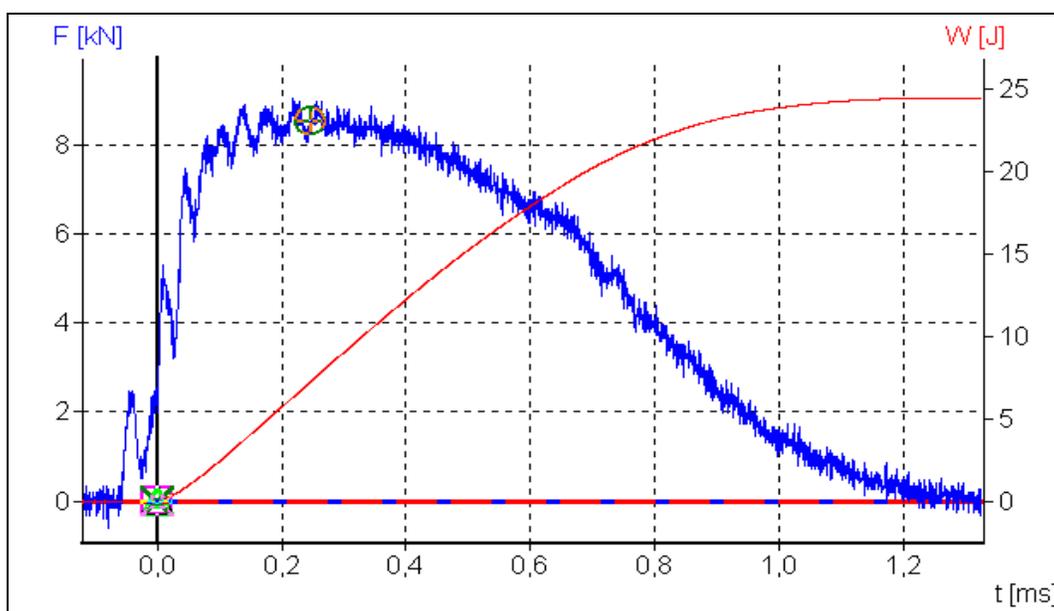


(b)

Figura A8– (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - pré-trincado - 009 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 5,52 m/s, (300 J).

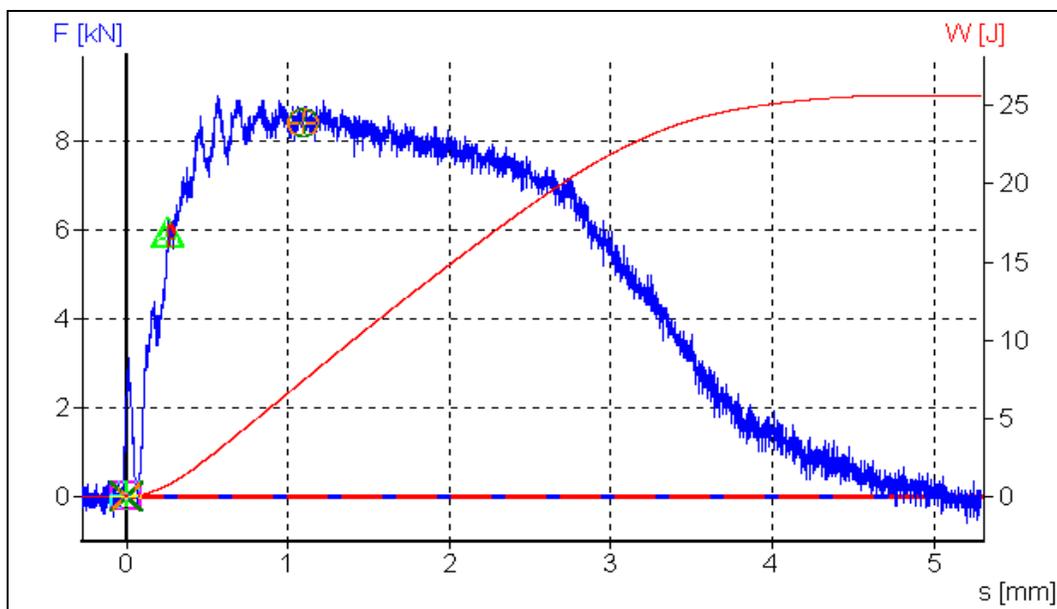


(a)

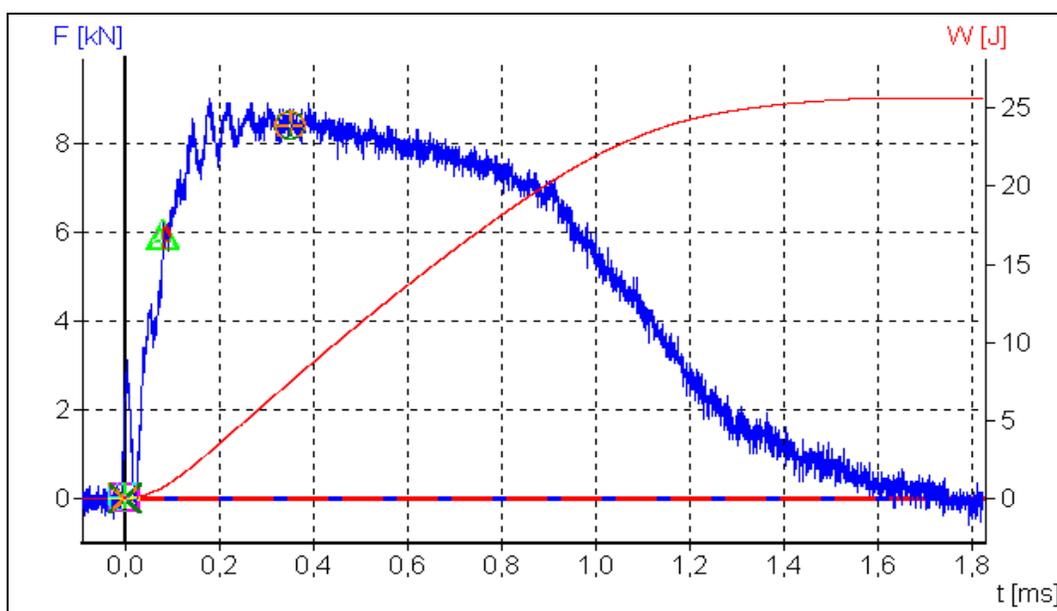


(b)

Figura A9 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp pré-trincado - 093 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 4,0 m/s, (158 J).

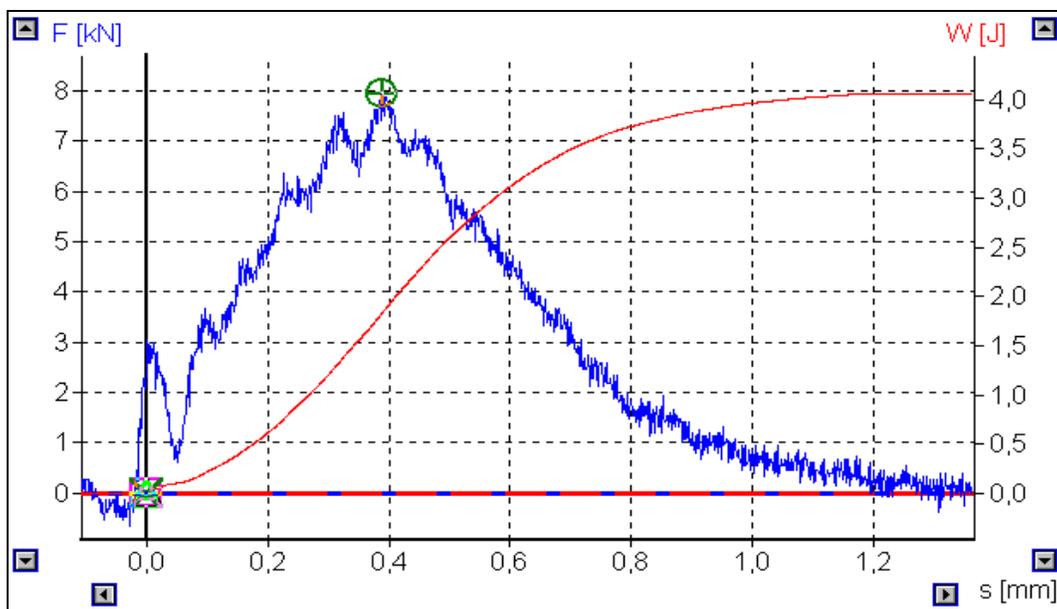


(a)

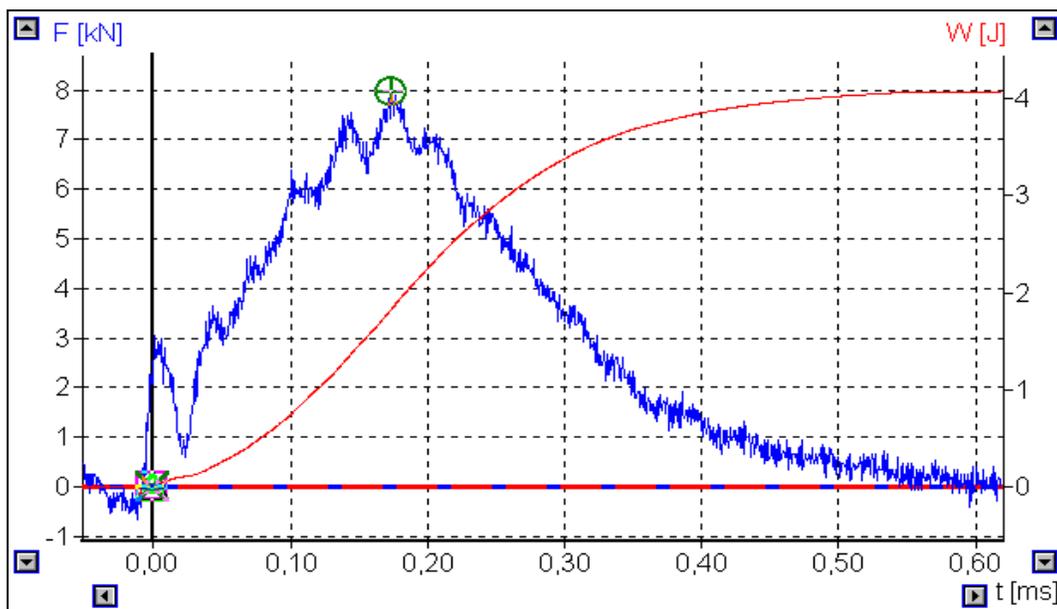


(b)

Figura A10 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do Cdp - pré-trincado - 094 (orientação L-S), velocidade de carregamento de 3,2 m/s, (100 J).

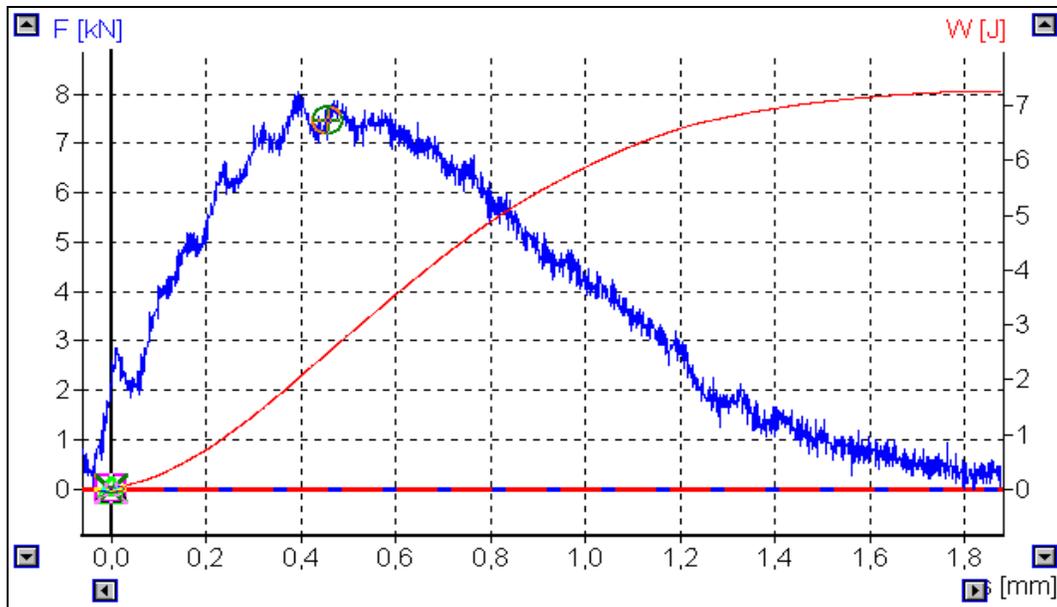


(a)

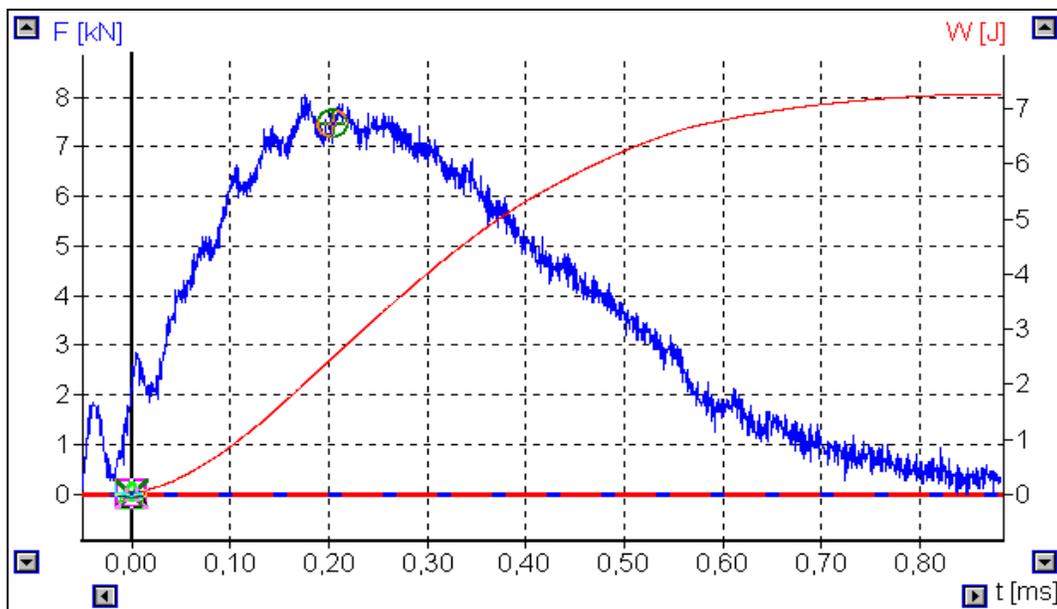


(b)

Figura A11– (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp – pré-trincado - 063 (orientação T-L), velocidade de carregamento de 2,25 m/s, (50 J).

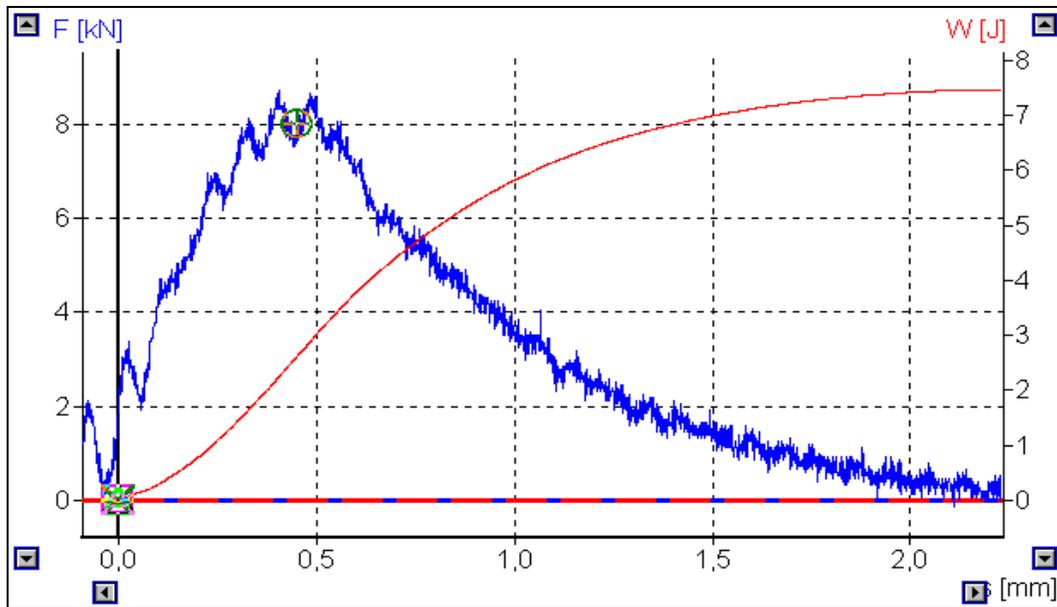


(a)

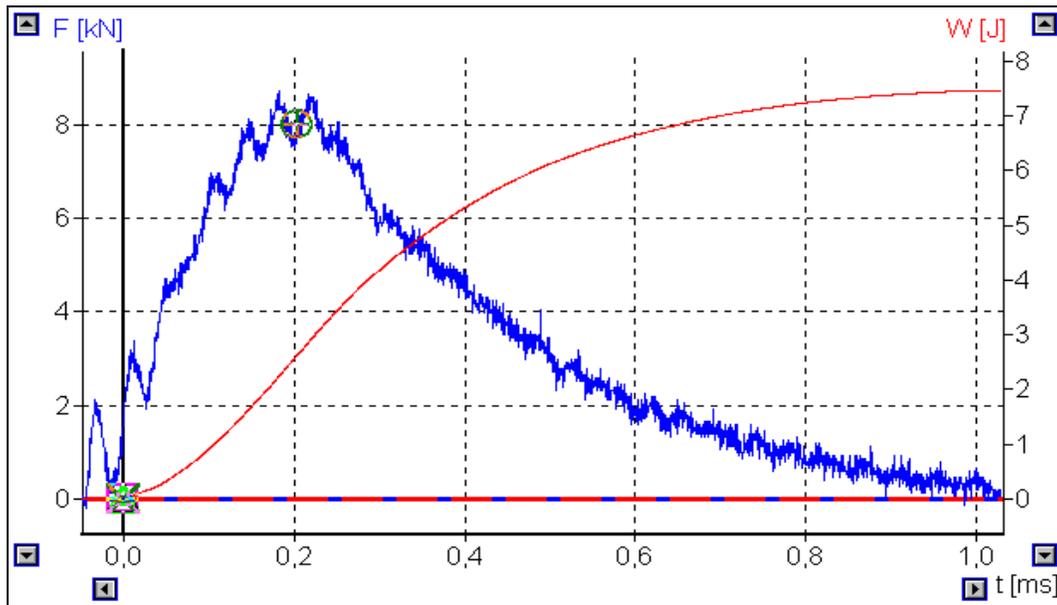


(b)

Figura A12 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b). carga-tempo-energia do cdp – pré-trincado - 073 (orientação T-S), velocidade de carregamento de 2,25 m/s, (50 J).



(a)



(b)

Figura A13 – (a) Gráfico carga-deslocamento-energia. (b) carga-tempo-energia do cdp - pré-trincado - 083 (orientação L-T), velocidade de carregamento de 2,25 m/s, (50 J).

10- ANEXO B – CURVAS SEM TRATAMENTO X TRATADAS

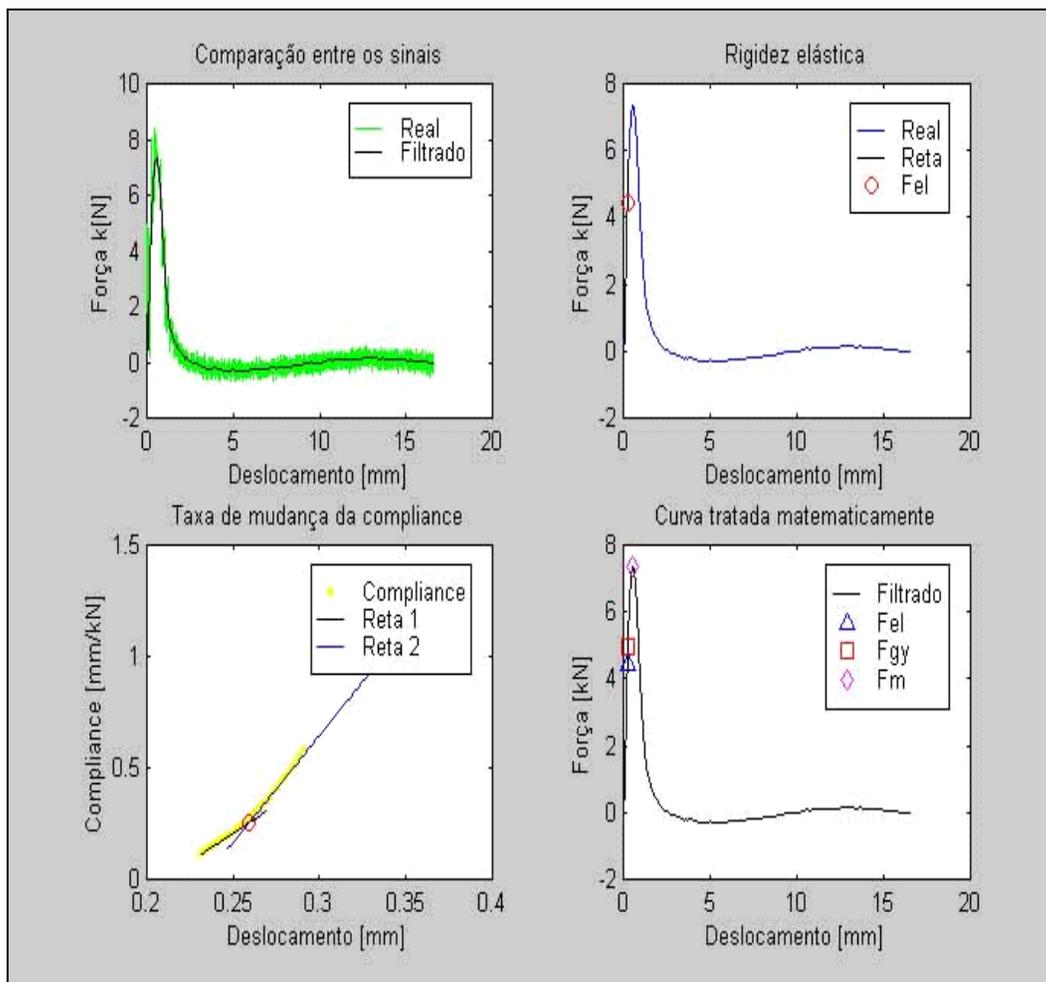


Figura B1 – Gráfico da carga-deslocamento do Cdp – 007 – pré-trincado (orientação T-S).
Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

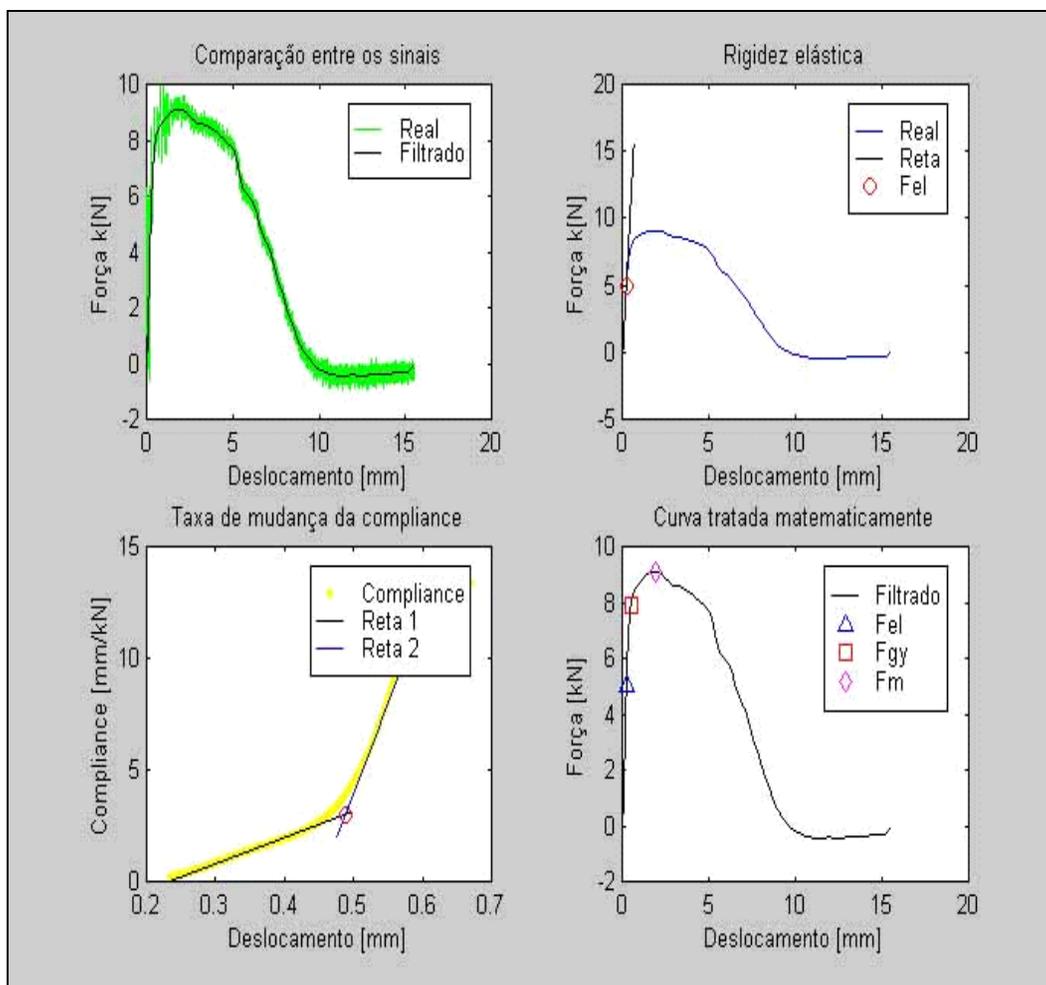


Figura B2 – Gráfico da carga-deslocamento do cdp – 009 – pré-trincado (orientação L-S).
Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

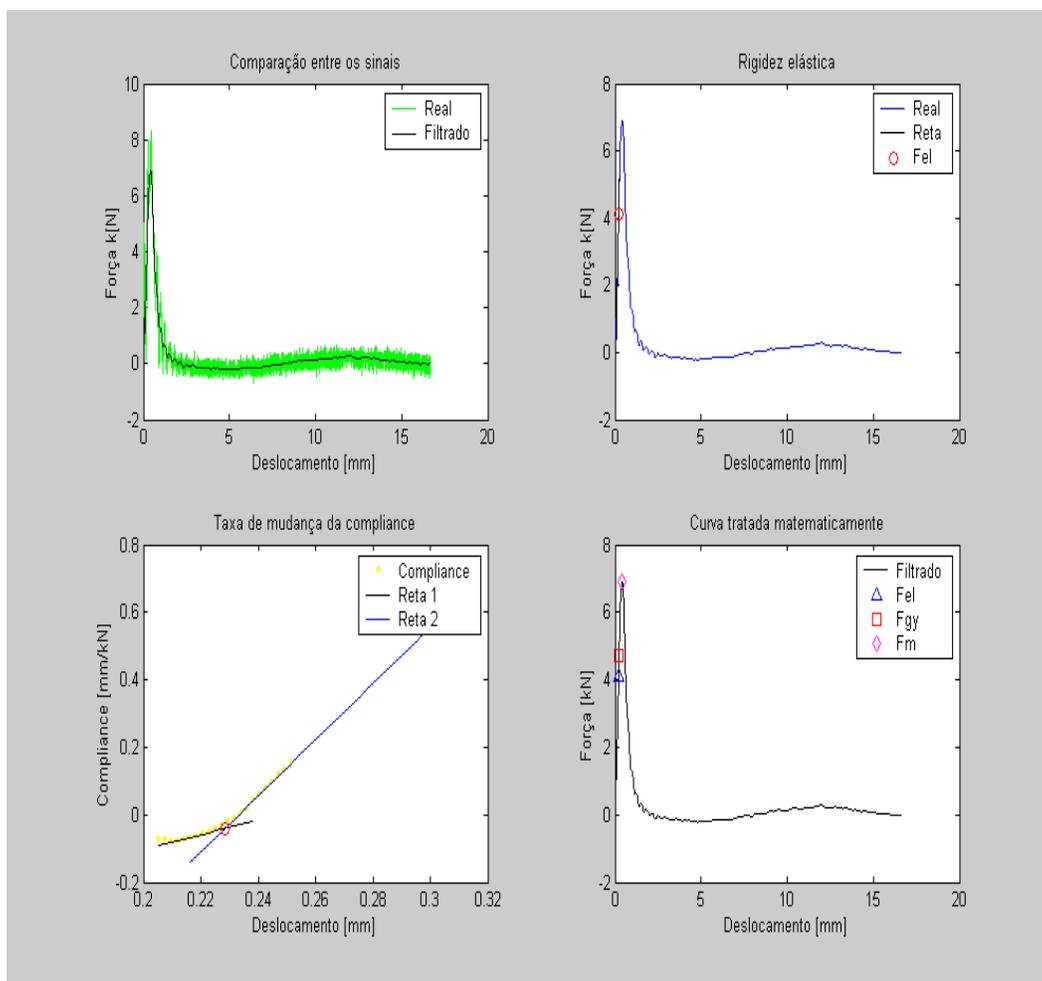


Figura B3 – Gráfico da carga-deslocamento do cdp – pré-trincado - 061 (orientação T-L).
Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

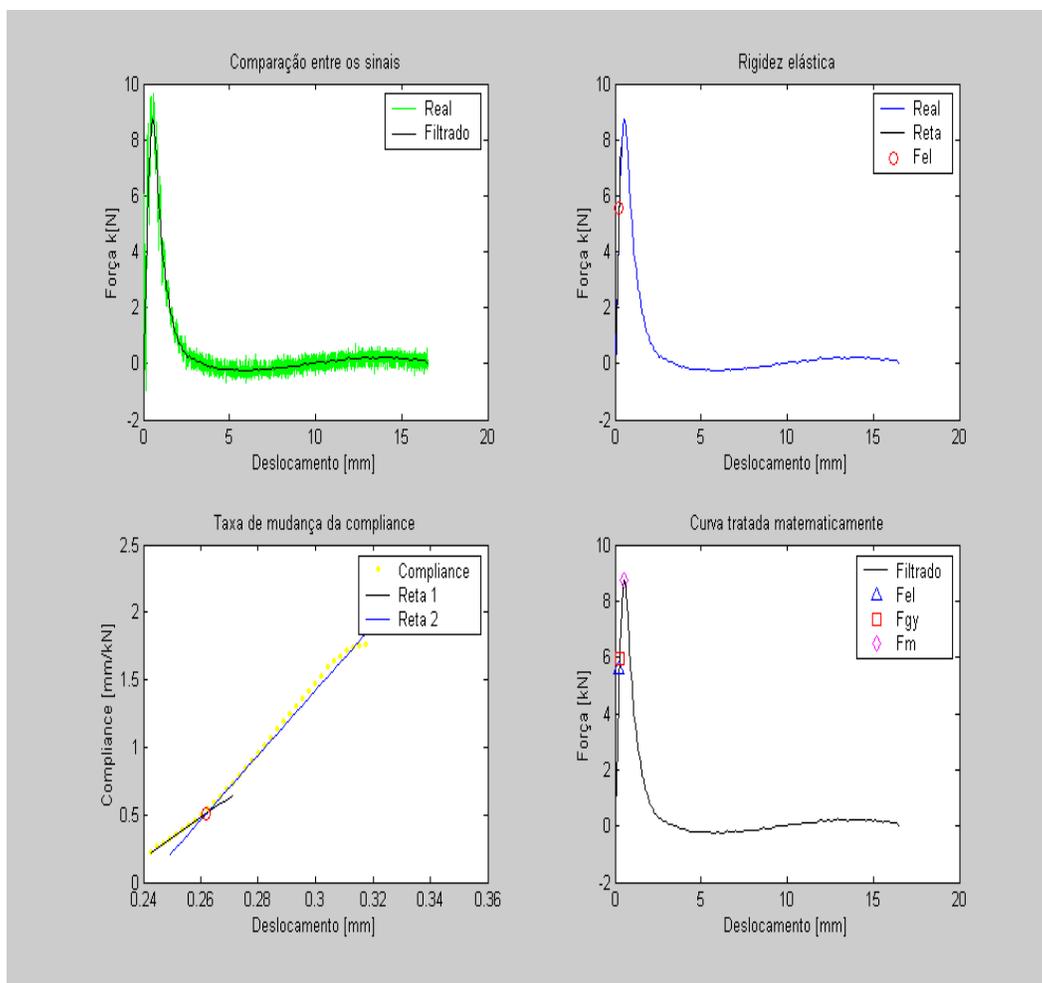


Figura B4 – Gráfico da carga-deslocamento do cdp – pré-trincado - 081 (orientação L-T).
Velocidade de carregamento de 5,52 m/s.

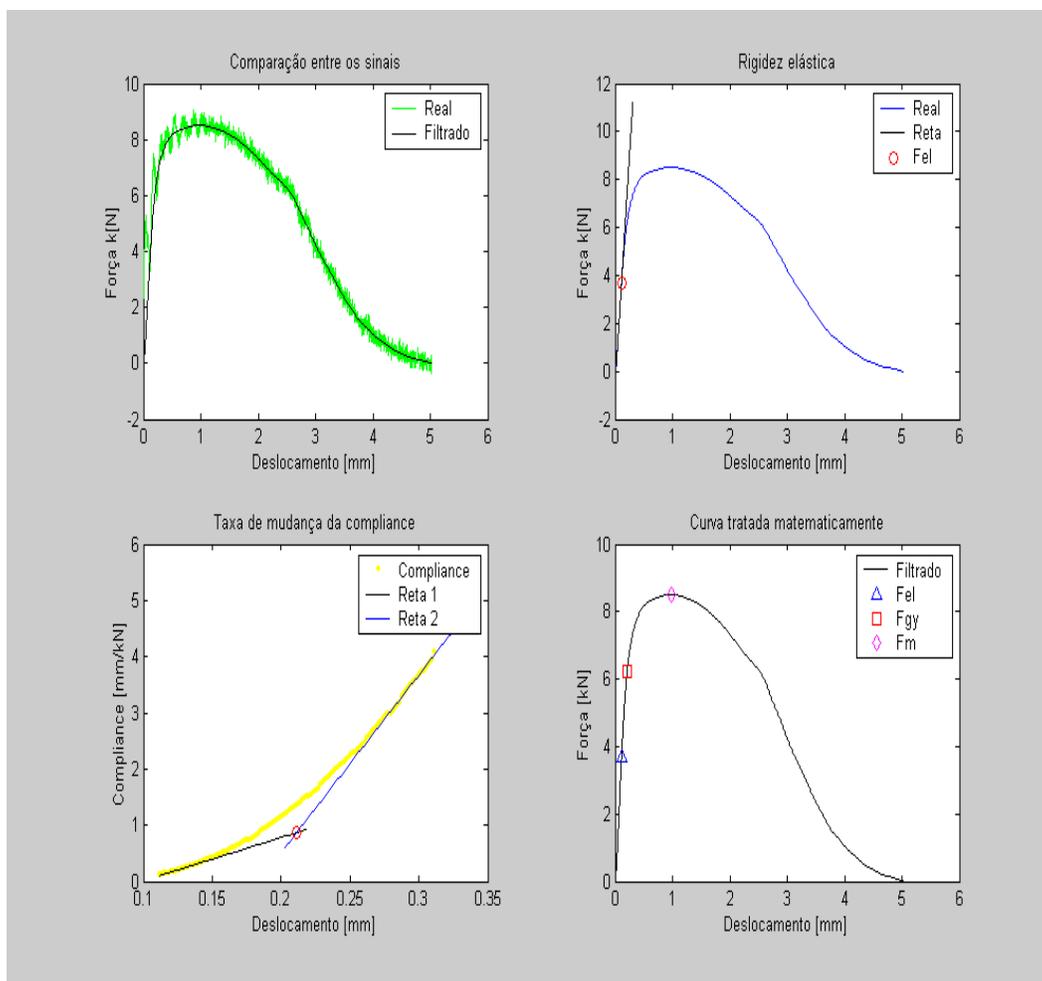


Figura B5 – Gráfico da carga-deslocamento do cdp – pré-trincado - 093 (orientação L-S).
Velocidade de carregamento de 4,0 m/s.

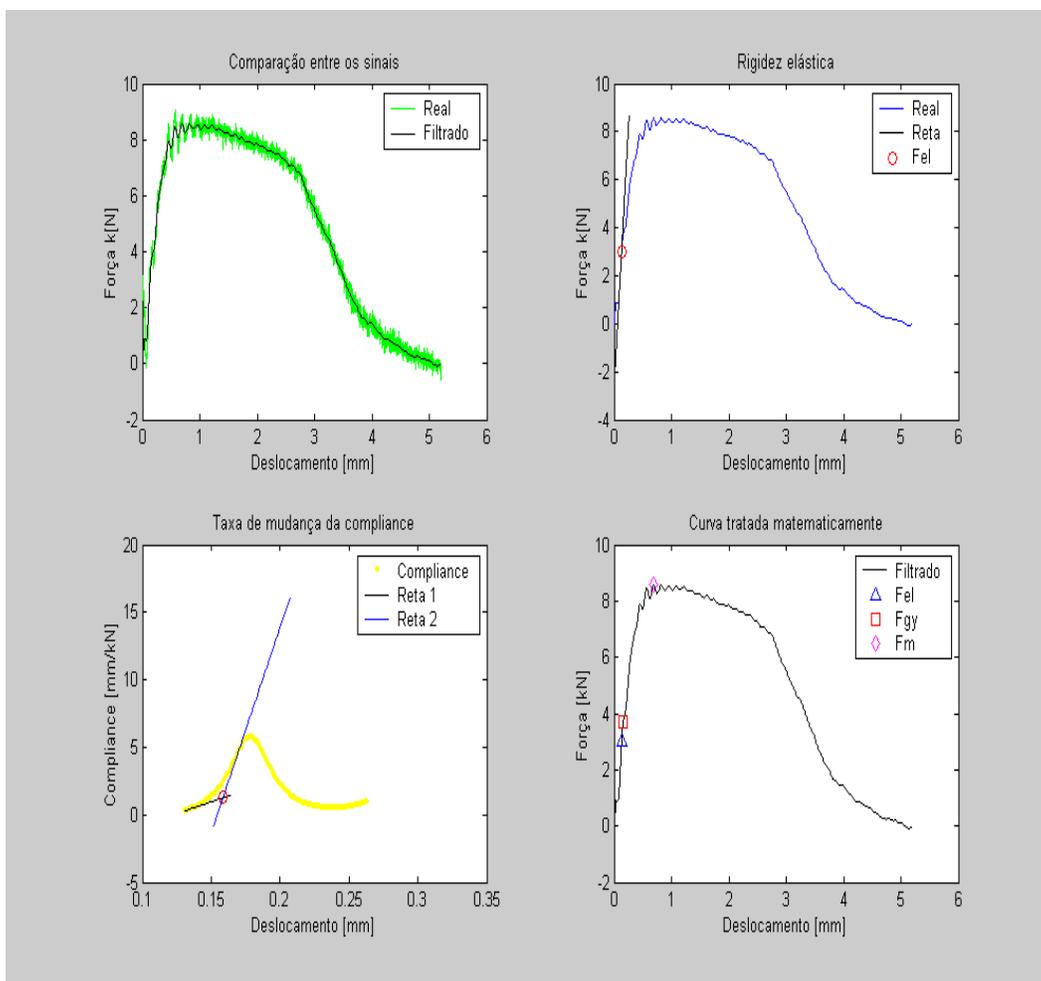


Figura B6 – Gráfico da carga-deslocamento do cdp – pré-trincado - 094 (orientação L-S).
Velocidade de carregamento de 3,2 m/s.

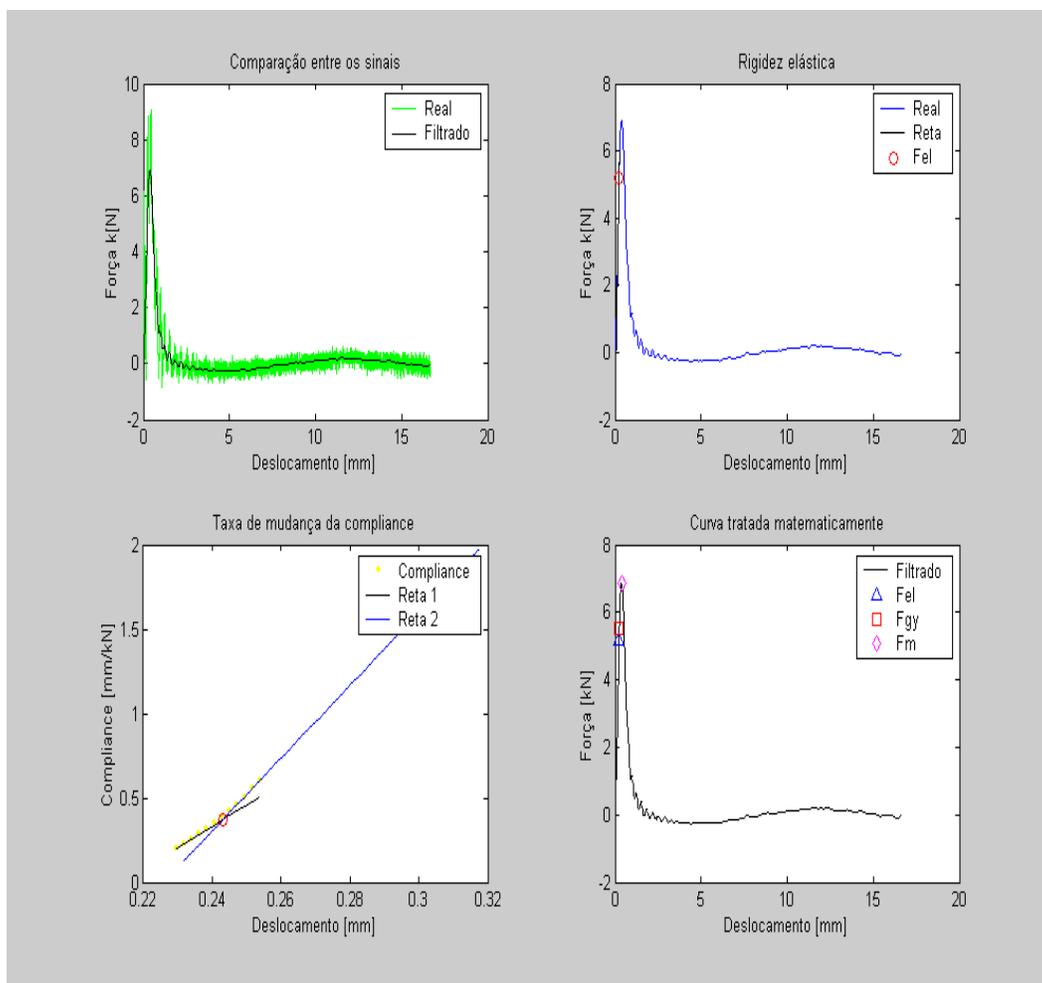


Figura B7– Gráfico da carga-deslocamento do cdp – pré-trincado - (orientação T-L).
Velocidade de carregamento de 2,25 m/s.

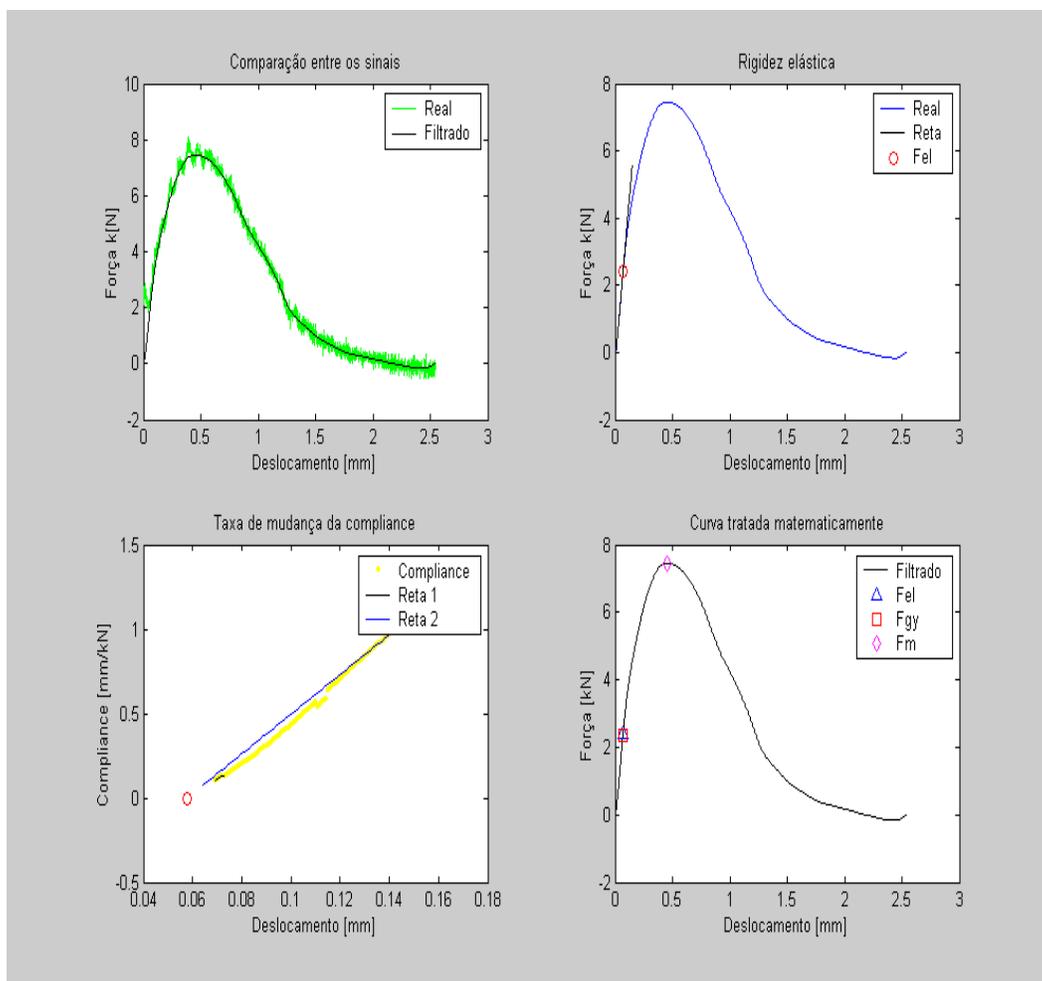


Figura B8 – Gráfico da carga-deslocamento do cdp – pré-trincado - (orientação T-S).
Velocidade de carregamento de 2,25 m/s.

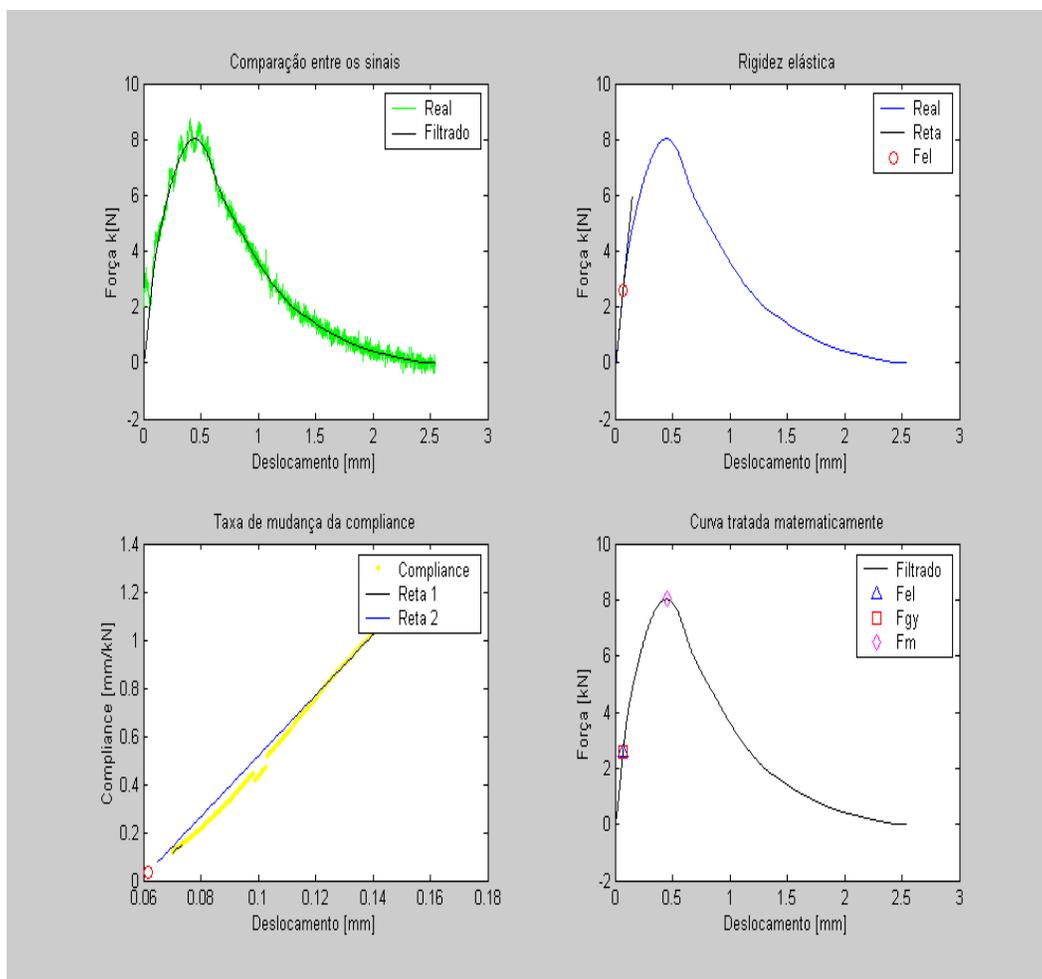


Figura B9 – Gráfico da carga-deslocamento do cdp – pré-trincado - 083 (orientação L-T).
Velocidade de carregamento de 2,25 m/s.

11 - ANEXO C – TABELAS

Tabela II – Resultados da análise de inclusões e intermetálicos nos principais planos da placa forjada.

T-S							
Amostras	inclusões	inclusões/área	% de inclusões	A tot. (mm ²)	intermetálicos	interm./area	% de Intern.
1	85	45,53	0,146520	1,86673	233	124,82	0,162800
2	51	27,32	0,073006	1,86673	149	79,82	0,113451
3	42	22,50	0,069953	1,86673	140	75,00	0,098443
4	76	40,71	0,114469	1,86673	211	113,03	0,165344
5	45	24,11	0,065120	1,86673	139	74,46	0,099715
total	299	160,17	0,469068	9,333650	872	467,13	0,639753
média	59,8	32,03	0,09	1,87	174,4	93,43	0,13
L-T							
Amostras	inclusões	inclusões/área	% de inclusões	A tot. (mm ²)	intermetálicos	interm./area	% de Intern.
1	27	14,46	0,022131	1,86673	83	44,46	0,230973
2	33	17,68	0,054945	1,86673	89	47,68	0,242420
3	23	12,32	0,027727	1,86673	76	40,71	0,190018
4	64	34,28	0,110908	1,86673	151	80,89	0,282611
5	37	19,82	0,052910	1,86673	147	78,75	0,183659
total	184	78,75	0,268621	9,333650	546	292,49	1,129681
média	36,8	15,75	0,05	1,87	109,20	58,50	0,23
L-S							
Amostras	inclusões	inclusões/área	% de inclusões	A tot. (mm ²)	intermetálicos	interm./area	% de Intern.
1	35	18,75	0,077330	1,86673	99	53,03	0,269892
2	35	18,75	0,055454	1,86673	94	50,36	0,251577
3	13	6,96	0,013736	1,86673	73	39,11	0,188238
4	23	12,32	0,019587	1,86673	75	40,18	0,108364
5	9	4,82	0,017298	1,86673	44	23,57	0,090030
total	115	61,61	0,183405	9,333650	385	206,24	0,908101
média	23	12,32	0,04	1,87	77	41,25	0,18

Planos das orientações	% inclusões	% intermetálicos	% total
T-S	0,09	0,13	0,22
L-T	0,05	0,23	0,28
L-S	0,04	0,18	0,22

Tabela IV - Resultados obtidos do ensaio de impacto Charpy instrumentado.

DEFEITO	Velocidade	CDP	P_m [kN]	E_{Pm} [J]	S_{Pm} [mm]	t_{Pm} [ms]	E_t [J]	S_t [mm]	t_t [ms]
ENTALHE	5,52m/s	T-L	9,100	3,290	0,550	0,089	5,880	0,837	0,152
ENTALHE	5,52m/s	T-S	9,700	4,270	0,630	0,137	8,300	1,250	0,227
ENTALHE	5,52m/s	L-T	10,000	5,800	0,800	0,146	8,700	1,090	0,200
ENTALHE	5,52m/s	L-S	10,100	13,680	1,730	0,306	51,040	6,420	1,214
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	006 T-L	6,000	1,460	0,362	0,064	3,850	0,862	0,162
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	061 T-L	6,360	1,680	0,368	0,067	3,887	0,901	0,161
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	062 T-L	6,588	1,700	0,366	0,067	3,805	0,872	0,160
Média	5,52m/s	T-L	6,316	1,613	0,365	0,066	3,847	0,878	0,161
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	007 T-S	7,300	1,880	0,427	0,076	6,230	1,290	0,234
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	071 T-S	7,750	1,880	0,403	0,071	9,000	2,500	0,457
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	072 T-S	7,410	1,800	0,400	0,070	7,700	2,300	0,408
Média	5,52m/s	T-S	7,487	1,853	0,410	0,072	7,643	2,030	0,366
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	008 L-T	9,000	4,000	0,670	0,118	7,600	1,070	0,197
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	081 L-T	8,270	3,830	0,500	0,096	5,690	0,838	0,158
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	082 L-T	8,670	4,670	0,740	0,131	7,453	1,068	0,191
Média	5,52m/s	L-T	8,647	4,167	0,637	0,115	6,914	0,992	0,182
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	009 L-S	9,100	15,000	1,857	0,342	57,630	9,476	1,884
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	091 L-S	8,250	13,250	1,858	0,375	44,700	8,198	1,562
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	092 L-S	9,000	14,823	1,937	0,357	43,440	5,375	1,300
Média	5,52m/s	L-S	8,783	14,358	1,884	0,358	48,590	7,683	1,582
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	063* T-L	5,920	1,392	0,351	0,063	3,830	0,857	0,168
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	073* T-S	7,290	1,830	0,421	0,078	6,230	1,286	0,234
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	083* L-T	8,900	4,000	0,640	0,117	7,500	1,078	0,192
PRÉ-TRINCA	4,0m/s	093* L-S	8,500	7,720	0,980	0,349	25,476	5,000	1,500
PRÉ-TRINCA	3,20m/s	094* L-S	8,410	7,610	1,125	0,245	24,430	5,000	1,200

Tabela V – Resultados da tenacidade à fratura dinâmica elasto-plástica, J_{Id} e da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , obtida pela conversão de J_{Id} .

DEFEITO	Velocidade	CDPs	$J_{Id}-E_I$ (KJ/m²)	$J_{Id}-E_{pm}$ (KJ/m²)	$K_{Id}-E_I$ (MPa m^{1/2})	$K_{Id}-E_{pm}$ (MPa m^{1/2})
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	006 T-L	21,500	36,500	39,617	51,619
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	061 T-L	18,450	42,000	36,699	55,371
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	062 T-L	20,375	42,500	38,567	55,700
Média	5,52m/s	T-L	20,108	40,333	38,294	54,230
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	007 T-S	23,000	47,000	40,976	58,575
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	071 T-S	23,100	47,000	41,065	58,575
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	072 T-S	22,675	45,000	40,685	57,315
Média	5,52m/s	T-S	22,925	46,333	40,908	58,155
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	008 L-T	23,850	100,000	41,726	85,440
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	081 L-T	24,225	95,750	42,053	83,605
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	082 L-T	20,400	116,750	38,590	92,319
Média	5,52m/s	T	22,825	104,167	40,790	87,121
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	009 L-S	52,825	375,000	62,099	165,454
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	091 L-S	51,175	331,250	61,121	155,503
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	092 L-S	59,750	370,575	66,044	164,475
Média	5,52m/s	L-S	54,583	358,942	63,088	161,811
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	063* T-L	8,475	34,800	24,873	50,402
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	073* T-S	4,025	45,750	17,141	57,791
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	083* L-T	4,550	100,000	18,225	85,440
PRÉ-TRINCA	4,0m/s	093* L-S	26,800	193,000	44,231	118,697
PRÉ-TRINCA	3,20m/s	094* L-S	7,725	190,250	23,747	117,848

Tabela VI – Resultados da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} obtida pela carga máxima e de iniciação, elasto-plástica, J_{Id} e da tenacidade à fratura dinâmica, K_{Id} , calculada por meio de J_{Id} .

DEFEITO	Velocidade	CDPs	K_{Id-Pm} (MPa $m^{1/2}$)	K_{Id-Pi} (MPa $m^{1/2}$)	J_{Id} - (K_{Id} - Pm) KJ/m ²	J_{Id} - (K_{Id} - Pi) KJ/m ²
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	006 T-L	28,020	24,284	10,755	8,078
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	061 T-L	29,701	21,949	12,084	6,599
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	062 T-L	30,766	25,685	12,966	9,037
Média	5,52m/s	T-L	29,496	23,973	11,935	7,905
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	007 T-S	34,091	23,350	15,920	7,469
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	071 T-S	36,193	26,152	17,944	9,369
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	072 T-S	34,605	26,619	16,404	9,706
Média	5,52m/s	T-S	34,963	25,374	16,756	8,848
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	008 L-T	42,030	25,685	24,199	9,037
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	081 L-T	38,621	28,020	20,433	10,755
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	082 L-T	40,489	25,218	22,457	8,712
Média	5,52m/s	L-T	40,380	26,308	22,363	9,501
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	009 L-S	42,497	36,893	24,740	18,645
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	091 L-S	38,528	34,558	20,334	16,360
PRÉ-TRINCA	5,52m/s	092 L-S	42,030	35,959	24,199	17,713
Média	5,52m/s	L-S	41,018	35,803	23,091	17,573
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	063*T-L	27,646	10,975	10,470	1,650
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	073 T-S	34,044	11,208	15,877	1,721
PRÉ-TRINCA	2,25m/s	083 L-T	41,563	12,142	23,664	2,020
PRÉ-TRINCA	4,0m/s	093*L-S	39,695	30,355	21,585	12,622
PRÉ-TRINCA	3,20m/s	094*L-S	39,275	17,279	21,130	4,090

Tabela VII – Resultados da área verdadeira da superfície de fratura dos corpos de prova entalhados e pré-trincados.

Ensaio	Cdp	Área (mm²)
5,52 m/s	001 – T-L - entalhado	102,40
5,52 m/s	002 – T-S - entalhado	125,67
5,52 m/s	003 – L-T - entalhado	97,76
5,52 m/s	004 – L-S - entalhado	291,01
5,52 m/s	006 – T-L- pré-trincado	98,66
5,52 m/s	007 – T-S - pré-trincado	124,41
5,52 m/s	008 – L-T - pré-trincado	101,27
5,52 m/s	009 – L-S - pré-trincado	177,19
4,0 m/s	093 – L-S - pré-trincado	132,24
3,2 m/s	094 – L-S - pré-trincado	131,13