CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

KÁTIA CRISTINA GOUVEIA

INVESTIGAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL (TTDF) UTILIZANDO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

São Bernardo do Campo

2013

KÁTIA CRISTINA GOUVEIA

INVESTIGAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL (TTDF) UTILIZANDO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário da FEI como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco.

São Bernardo do Campo

2013

Gouveia, Kátia Cristina

Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de impacto charpy / Kátia Cristina Gouveia. São Bernardo do Campo, 2013.

160 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Rodrigo Magnabosco.

1. TTDF. 2. Tenacidade. 3. Temperatura de Transição Dúctil-Frágil. I. Magnabosco, Rodrigo, orient. II. Título.

CDU 620.17

Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Kátia Cristina Gouveia **Matrícula:** 211108-6

Título do Trabalho: Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando ensaio de impacto charpy.

Área de Concentração: Materiais e Processos

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Data da realização da defesa: 28/06/2013

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

São Bernardo do Campo, 28 de Junho de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Ass.: _____

Prof. Dr. Gustavo Henrique Bolognesi Donato

Ass.: _____

Prof. Dr. Carlos de Moura Neto

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

Dedico este trabalho às pessoas que não me deixaram desistir, e a Deus, por ter colocado estas pessoas em meu caminho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido, que a sua maneira, também dedicou muitas horas a este trabalho.

À minha mãe, que fez a solidão dos meus estudos mais leve e mais doce.

Ao meu pai, que no seu silêncio sempre se fez presente.

Aos demais membros da minha família, que fizeram da minha ausência uma chance de demonstrar o quanto se importam comigo, por seu carinho e compreensão.

A todos os colegas que cruzaram meu caminho desde o início do curso de Mestrado.

Ao Prof. Gustavo Donato e ao Sr. Fabio Cavalcanti, que muito acrescentaram ao meu entendimento do material estudado.

Ao Prof. William Naville e ao Sr. Gustavo Estrela, que auxiliaram na execução dos ensaios, e obtenção de dados para este trabalho.

Aos Prof. Mauro Andreassa e Luiz Antonio Pacífico, que foram os meus primeiros avaliadores nesta longa jornada.

E, finalmente, ao professor Rodrigo Magnabosco, meu orientador, que com sua objetividade, disponibilidade e clareza me orientou durante o caminho até a obtenção de todo o conhecimento que há neste trabalho.

“... o sofrimento é passageiro, mas a conquista é para sempre...”

Autor Desconhecido

RESUMO

Os aços estruturais são materiais amplamente utilizados na construção e na indústria. A ocorrência de fraturas frágeis catastróficas nos navios da classe Liberty durante a 2ª Guerra Mundial, no entanto, trouxe à tona a necessidade de determinar uma temperatura limite, abaixo da qual o comportamento à fratura do material se altera de dúctil a frágil, de maneira a prever e evitar tais ocorrências. A essa temperatura se deu o nome de Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (TTDF) dos materiais. Naquela época, no entanto, pouco sobre o assunto havia sido documentado e, dentre os ensaios disponíveis, o ensaio de impacto Charpy foi então considerado o ensaio que mais se adequava às necessidades para o estudo deste assunto, e permanece até hoje com ampla utilização para este fim. Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a determinação da TTDF utilizando várias metodologias, e realizar um estudo comparativo entre os resultados obtidos. Foi estudado o aço ASTM A-36 (2012) com três graus de deformação. Corpos de prova tipo A foram utilizados para realização de ensaio de impacto a diversas temperaturas, conforme norma ASTM E23 (2012). As diferentes definições para a TTDF dos aços estruturais foram apresentadas e utilizadas. O valor da TTDF considerando a condição de fragilidade nula do material é o maior dentre eles, sendo portanto o mais conservador. Quando se avaliam os dados de TTDF obtidos pela medição da expansão lateral dos corpos de prova, vê-se que com estes resultados não é possível avaliar alterações no comportamento do material devido ao efeito da pré-deformação. Já o comportamento de transição do material quando considerado o valor da TTDF na qual o material apresenta 50% de fratura dúctil e 50% de fratura frágil é muito similar nas 3 condições de pré-deformação adotadas, considerando ambas as metodologias de avaliação visual das faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto, embora os valores sejam divergentes dos valores obtidos pelos métodos analíticos. Pela avaliação das faces de fratura dos corpos de prova por microscopia eletrônica de varredura, foi possível visualizar que nas regiões onde, por avaliação visual, considerou-se que havia fratura por clivagem, também haviam regiões com alvéolos resultantes de deformação plástica do material, típicos de fratura dúctil. Sendo assim, a determinação da TTDF pelo método da porcentagem de fratura dúctil ou por clivagem fica comprometida. Por fim, verificou-se que a metodologia mais indicada para determinação da TTDF é aquela obtida considerando que a TTDF é a temperatura na qual a energia absorvida é a média da energia absorvida nos patamares superior e inferior em função da temperatura, por tratar-se de um método simples, de fácil reprodutibilidade e aquela que melhor refletiu a tendência de comportamento do material quando se aplicam pré-deformações de até 8,6% no material.

Palavras chave: TTDF, Tenacidade, Temperatura de Transição Dúctil-Frágil, Ensaio de Impacto.

ABSTRACT

Structural steels are widely used in all areas of construction and industry. The occurrence of catastrophic brittle fracture on Liberty Ships during II World War, however, brought the need of establishing a limiting temperature below which the material behavior will change, and occurrence of catastrophic brittle fracture could be anticipated and avoided. This temperature was named Ductile-to Brittle Transition Temperature (DBTT). At that time, however, little information about this subject had been documented, and Charpy impact test was considered the most adequate procedure considering all available, and is still the most used test for this purpose. However, it would be necessary to define adequate criteria to define DBTT. The purpose of this work is to determine DBTT by using several methodologies, and make a comparative study between them. It was used an ASTM A-36 steel, with various prestrain levels. Type A samples were made from a steel plate of 12.7mm in thickness to be tested by Charpy impact test according to ASTM E23-2012 standard, at different temperatures. Different definitions for DBTT are presented, discussed and used. The DBTT value considering the null brittle behavior is the largest value among all, being the most conservative value. When DBTT values were obtained from lateral expansion data, it was not possible to notice any relation with prestrain condition. On the other hand, material transition behavior when DBTT value is defined as the temperature for which a material presents 50% of brittle fracture and 50% of ductile fracture is very similar between two conditions of deformation, for both quantitative and qualitative methods of evaluation, although these values are different from analytical results. Using scanning electron microscopy, it is possible to visualize that in the portions where, from visual analysis, it is considered that a brittle fracture occurs, there are also dimples characteristics of plastic deformation, which means that a ductile fracture also occurs. It means that DBTT establishment by visual methods is not quite precise. As a conclusion, it is established that the most indicate methodology for DBTT determination is the one that determines as DBTT the temperature at which absorbed energy is the average between superior and inferior absorbed energy, since it is a simple methodology, easy to be done and to be reproduced, and the one that expresses material behavior tendency in the best way, for materials deformed until 8.6% before impact test.

Key Words: DBTT, Toughness, Ductile-to-Brittle Transition Temperature, Impact testing

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões dos corpos de prova “Tipo U” normatizados na Rússia. 47
Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova “Tipo V” normatizados na Rússia. 48
Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova “Tipo T” normatizados na Rússia. 50
Tabela 4. Comparativo da TTDF obtida para diferentes materiais, por diferentes critérios. ...56
Tabela 5 – Valores de referência para determinação da porcentagem de fratura dúctil de um corpo de prova de ensaio de impacto Charpy a partir da medição da área de fratura por clivagem. 59
Tabela 6 – Valores de referência para determinação da porcentagem de fratura dúctil de um corpo de prova de ensaio de impacto Charpy a partir da medição da área de fratura por clivagem (continuação).....60
Tabela 7. Valores da TTDF após ajuste pelo método da Tangente Hiperbólica dos dados do material A-508 estudado por Tanguy et al. (2007), ensaiado a 3 diferentes taxas de deformação. 70
Tabela 8. Energia absorvida no patamar superior para cada tipo de entalhe adotado. 74
Tabela 9. Comparação dos valores da TTDF-mEn obtidos para as diferentes geometrias do entalhe adotados, a partir dos dados de Druce et al. (1987), calculados pelo Método da Tangente Hiperbólica. 76
Tabela 10. Propriedades mecânicas do aço API 5L X70 e resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy. 78
Tabela 11 – Valores de TTDF-mEn obtidos a partir dos dados de Shin et al. (2006). 79
Tabela 12. Resultados de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy para o aço API 5L X70, a diversas temperaturas, sendo que o material foi produzido a diversos graus de deformação na etapa de acabamento da laminação. 80
Tabela 13. Resultados de TTDF-mEn para o aço API 5L X70 sob diversas condições de deformação. 81
Tabela 14. Resultados do percentual de fratura dúctil obtido nos ensaios de impacto Charpy para o aço API 5L X70, a diversas temperaturas, sendo que o material foi produzido a diversos níveis de deformação na etapa de acabamento da laminação. 82
Tabela 15 – Valores de TTDF-mEn nas diferentes posições de retirada do corpo de prova, conforme Figura 55. 88
Tabela 16 – Valores de TTDF-mEn do aço bifásico 590 ensaiado por Chao et al. (2005). 94

Tabela 17 – Valores de TTDF (em °C) obtidos a partir do tratamento dos dados de ensaio de impacto para 2 aços diferentes em 2 posições diferentes de retirada do corpo de prova. 96
Tabela 18 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição de deformação do material, a partir dos valores de energia absorvida em função da temperatura. 112
Tabela 19 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, utilizando os dados de expansão lateral em função da temperatura.....127
Tabela 20 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, pelo critério da porcentagem de fratura dúctil qualitativo. 133
Tabela 21 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, pelo critério da porcentagem de fratura dúctil quantitativo. 138
Tabela 22 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, pelos diferentes critérios de avaliação. 139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Navio com ruptura frágil devido à fragilização do material 23
Figura 2 - Gráfico genérico de energia absorvida x temperatura obtido pelo ensaio de impacto Charpy. 24
Figura 3 - Faces de fratura de um material metálico ensaiado por ensaio de impacto Charpy a diversas temperaturas, sendo T(a) <T(b) <T(c) <T(d) 25
Figura 4 - Curva tensão em função da deformação e indicação da área abaixo da curva, evidenciando o módulo de tenacidade do material ensaiado. 27
Figura 5 - Equipamento para ensaio de impacto. 29
Figura 6 - Representação esquemática do percurso que o pêndulo percorre durante o ensaio de impacto. 31
Figura 7 - Formatos de corpo de prova para ensaio de impacto apresentados na norma ASTM E23. 33
Figura 8 – Posicionamento de um corpo de prova tipo A para ensaio de impacto Charpy. 33
Figura 9 – Curvas características de energia absorvida em função da temperatura para materiais com diferentes estruturas cristalinas 34
Figura 10 - Distribuição elástica de tensões para estado plano de tensão (supondo desprezível a espessura). 35
Figura 11 - Distribuição elástica de tensões para estado plano de deformação. 36
Figura 12 - Extensão de zona plástica caracterizando ocorrência de fraturas dúctil e frágil num corpo de prova que apresente uma trinca central. 37
Figura 13 - Curvas de energia absorvida e porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura para corpos de prova do aço A-283 testados com diversas espessuras. 38
Figura 14 - Exemplo de como a curva tensão-deformação de um material pode ser alterada pela utilização de entalhe no corpo de prova. 39
Figura 15 - Exemplo de que a inserção de um entalhe propicia a ocorrência de fratura frágil em materiais com pouca capacidade de deformação plástica. 39
Figura 16 - Taxa de deformação obtida em corpos de prova entalhados para ensaio de impacto Charpy, a diversas distâncias da ponta do entalhe. 40
Figura 17 – Possibilidades de posicionamento de para retirada do corpo de prova do ensaio Charpy e localização do entalhe. 41

Figura 18 – Comparativo entre 3 condições diferentes, quanto ao direcionamento de retirada e confecção do entalhe do corpo de prova para ensaio Charpy, de aço baixo carbono laminado a frio. 42
Figura 19 – Exemplos de corpos-de-prova não-normatizados utilizados na Rússia para o desenvolvimento do ensaio de impacto naquele país. 46
Figura 20 – Corpos de prova “Tipo U” normatizados na Rússia. 47
Figura 21 - Corpos de prova “Tipo V” normatizados na Rússia. 48
Figura 22 - Corpos de prova “Tipo T” normatizados na Rússia. 49
Figura 23 – Gráficos comparativos do fator concentrador de tensões em função das características dimensionais do corpo de prova e do entalhe. 51
Figura 24 – Formas de representação dos resultados do ensaio de impacto Charpy, em função do tipo de entalhe. 53
Figura 25 – Faces de fratura obtidos em ensaios de impacto Charpy com corpos de prova do aço API 5L X80 a diversas temperaturas. 54
Figura 26 - Fotografias de referência para avaliação das faces de fratura de corpos de prova ensaiados por impacto. 57
Figura 27 - Desenhos esquemáticos de referência para avaliação das faces de fratura do ensaio de impacto Charpy. 57
Figura 28 – Desenho esquemático de referência apresentado na norma ASTM E23 para avaliação da face de fratura do corpo de prova Charpy. 58
Figura 29 – Indicação das dimensões para verificação da porcentagem de fratura dúctil na face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto. 60
Figura 30 – Croqui das metades de um corpo de prova Charpy após ensaio, indicando as regiões de medição da expansão lateral do corpo de prova (cotas A1, A2, A3 e A4) e sua dimensão original (cotas W). 61
Figura 31 – Metades de um corpo de prova Charpy após ensaio, indicando as regiões de medição da expansão lateral do corpo de prova (cotas A1, A2, A3 e A4) e sua dimensão original (cotas W). 62
Figura 32 – Dados experimentais de energia absorvida em função da temperatura. 63
Figura 33 – Ilustração da determinação dos parâmetros A e B a partir dos dados experimentais de energia absorvida em função da temperatura, para ajuste da curva pelo método da Tangente Hiperbólica. 64

Figura 34 – Exemplo de gráfico de energia absorvida em função da temperatura da região de transição, para ajuste pelo método da Tangente Hiperbólica. 64
Figura 35 – Dados de energia absorvida em função da temperatura ajustados pelo método da Tangente Hiperbólica, e indicação da determinação da TTDF a partir desta curva. 65
Figura 36 – Gráfico de energia absorvida em função da temperatura e diferentes TTDFs que podem ser obtidas a partir dele. 67
Figura 37 – Gráfico de expansão lateral em função da temperatura e TTDF que pode ser obtida a partir dele. 67
Figura 38 – Gráfico de porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura e diferentes TTDFs que podem ser obtidas a partir dele. 68
Figura 39 – Gráfico de energia absorvida em função da temperatura e a determinação indireta das TTDF-TDN e TTDF-TFN. 68
Figura 40 – Gráfico de expansão lateral em função da temperatura e a determinação indireta das TTDF-TDN e TTDF-TFN. 69
Figura 41 – Curvas de energia absorvida em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica confeccionado com os dados obtidos por Tanguy et al. (2007, p. 32). . 70
Figura 42 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 8, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987). 71
Figura 43 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 8s, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987). 72
Figura 44 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 5, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987). 72
Figura 45 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 5s, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987). 73
Figura 46 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cu 5 ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987). 73
Figura 47 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 2,5, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987). 74
Figura 48 – Fratografia das faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto com entalhe tipo Cv8 a diversas temperaturas. 75
Figura 49 - Curva de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy em função da temperatura para o aço API 5L X70 com microestrutura composta principalmente por ferrita acicular. 77

Figura 50 - Curva de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy em função da temperatura para o aço API 5L X70 com microestrutura composta por ferrita poligonal e austenita retida. 78
Figura 51 - Registro das faces de fratura de corpos de prova do material API 5L X70, obtidos a diversas deformações, e ensaiados a diversas temperaturas. 80
Figura 52 – Curvas de energia absorvida em função da temperatura do aço API 5L X70 sob diversas condições de deformação no acabamento da laminação, ajustadas pelo critério da Tangente Hiperbólica. 81
Figura 53 – Gráfico da porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura utilizando os dados de Plaut et al. (2006). 83
Figura 54 – Resultados de energia absorvida em função da temperatura para o aço API 5L X70 ajustados pelo método da Tangente Hiperbólica. 84
Figura 55 – Imagens das faces de fratura de um aço API 5L X70, ensaiado por ensaio de impacto Charpy à temperatura de 193K (-80°C). a) velocidade 0,003 mm/s, (b) velocidade 1000 mm/s. 84
Figura 56 – Imagens das faces de fratura de um aço API 5L X70, ensaiado por ensaio de impacto Charpy à temperatura de 213K (-60°C). a) velocidade 0.01 mm/s, (b) velocidade 1000 mm/s. 85
Figura 57 – Posições de retirada dos corpos de provado aço API 5L X80: a) com entalhe transversal ao sentido de laminação, b) com entalhe paralelo ao sentido de laminação. 86
Figura 58 – Curva de energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da Tangente Hiperbólica para as diferentes posições de confecção do entalhe, para uma mesma posição de retirada do corpo de prova conforme Figuras 55a) e 55b). 87
Figura 59 – Curva de energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da Tangente Hiperbólica para as diferentes posições de confecção do entalhe, para uma mesma posição de retirada do corpo de prova conforme Figuras 55a) e 55b). 87
Figura 60 – Curva de energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da Tangente Hiperbólica para as diferentes posições de confecção do entalhe, para uma mesma posição de retirada do corpo de prova conforme Figuras 55a) e 55b). 88
Figura 61 – Resultados de energia absorvida em função da temperatura para um aço inoxidável dúplex ensaiado por ensaio de impacto Charpy, a diversas temperaturas, e indicação da Temperatura de Transição. 89

Figura 62 - Faces de fratura de corpos de prova do aço UNS S31803, ensaiados por ensaio de impacto Charpy, a diversas temperaturas (-196°C, -73°C, -30°C, 21°C, 70°C). 90
Figura 63 - Resultados de energia abosrvida em função da temperatura para o aço A508 ensaiado por ensaio de impacto Charpy, (a) sem o efeito da radiação no material e (b) com o efeito da radiação no material. 91
Figura 64 - Curvas de energia absorvida em função da temperatura de um aço bifásico japonês, ensaiados por ensaio de impacto Charpy, utilizando 3 diferentes dimensões. 92
Figura 65 - Posicionamento de retirada dos corpos de prova para análise do aço bifásico 590. 93
Figura 66 – Gráfico de energia absorvida em função da temperatura ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica do material bifásico 590 ensaiado por Chao et al. (2005). 94
Figura 67 - Orientação dos corpos-de-prova em relação ao sentido de laminação do material. 95
Figura 68 - Resultados de energia absorvida em função da temperatura obtidos para 2 aços de alta resistência e baixa liga, tendo sido retirados corpos de prova nos sentidos longitudinal (L) e transversal (T), conforme indicação na Figura 67. 96
Figura 69 - Faces de fratura de corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy confeccionados com aço ASTM A36. A linha superior indica a temperatura de ensaio (em °C). 97
Figura 70 – Croqui de retirada dos corpos de prova na placa de aço ASTM A36. 99
Figura 71 – Microscópio óptico utilizado para avaliação da microestrutura do material. 100
Figura 72 – Material colocado na máquina de tração para realização das deformações utilizadas nas tiras do material antes da retirada dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy. 101
Figura 73 – Serra de fita do Centro Universitário da FEI utilizada para corte grosseiro dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy. 101
Figura 74 – Indicação do sentido de retirada do corpo de prova em relação ao sentido de laminação do material. 102
Figura 75 – Corpos de prova confeccionados para realização deste trabalho. 102
Figura 76 – Registro do banho utilizado para imersão dos corpos de prova para atendimento às temperaturas desejadas para ensaio dos materiais ao impacto e o posicionamento do termopar utilizado para conferência da temperatura. 103
Figura 77 – Estufa utilizada para estabilizar os corpos de prova a temperaturas mais altas que a ambiente, antes do ensaio de impacto Charpy. 104

Figura 78 – Máquina de Ensaio Charpy do Centro Universitário da FEI. 104
Figura 79 – Projetor de Perfis do Centro Universitário da FEI. 105
Figura 80 – Microscópio Eletrônico de Varredura do Centro Universitário da FEI. 105
Figura 81 – Imagem de metalografia sem ataque para avaliação do nível de inclusões do material da Placa 3. 106
Figura 82 – Microestrutura do material sem deformação, após ataque de Nital 2%. Ferrita e perlita são observadas. 107
Figura 83 – Microestrutura do material com 4,5% de deformação, após ataque de Nital 2%. Ferrita e perlita são observadas. 107
Figura 84 – Microestrutura do material com 8,6% de deformação, após ataque de Nital 2%. Ferrita e perlita são observadas. 108
Figura 85 – Curva tensão-deformação do material sem pré-deformação. A linha pontilhada indica a inclinação referente ao trecho elástico-linear, e as linhas cheias vermelha e azul esquematizam o trecho inicial das curvas tensão-deformação para os materiais com 4,5% e 8,6% de deformação respectivamente, indicando a redução do módulo de tenacidade com o aumento da pré-deformação. 109
Figura 86 - Gráfico de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova do aço isento de deformação prévia ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 110
Figura 87 - Gráfico de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova do aço com 4,5% de deformação prévia ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 110
Figura 88 - Gráfico de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova do aço com 8,6% de deformação prévia ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 111
Figura 89 - Gráfico da sobreposição das curvas de energia absorvida em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de pré-deformação. 112
Figura 90 – Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 66°C. 114
Figura 91 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 21°C. 114

Figura 92 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 9°C. 115
Figura 93 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -2,7°C. 115
Figura 94 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -11°C. 116
Figura 95 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -29,3°C. 116
Figura 96 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -49°C. 117
Figura 97 - Faces de fratura dos corpos retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -196°C. 117
Figura 98 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 73°C. 118
Figura 99 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 20,3°C. 118
Figura 100 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 10°C. 119
Figura 101 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -3°C. 119
Figura 102 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -11°C. 120
Figura 103 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -30°C. 120
Figura 104 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -50°C. 121
Figura 105 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -196°C. 121
Figura 106 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 73°C. 122
Figura 107 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 20,3°C. 122

Figura 108 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 10°C. 123
Figura 109 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -3°C. 123
Figura 110 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -11°C. 124
Figura 111 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -30°C. 124
Figura 112 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -50°C. 125
Figura 113 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -196°C. 125
Figura 114 - Gráfico da expansão lateral em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material sem deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 126
Figura 115 - Gráfico da expansão lateral em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 4,5%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 126
Figura 116 - Gráfico da expansão lateral em função da temperatura dos corpos prova retirados da placa de material com deformação prévia de 8,6%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 127
Figura 117 - Gráfico da sobreposição das curvas de expansão lateral em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de deformação, e as faces de fratura de corpos de prova ensaiados às temperaturas dos patamares superior e inferior e também próxima à TTDF. 128
Figura 118 – Exemplo de realização da avaliação da porcentagem de fratura dúctil qualitativa, feita pela comparação da face de fratura com a referência da norma ASTM E23 (2012). 129
Figura 119 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material sem deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 130
Figura 120 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 4,5%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 131

Figura 121 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 8,6%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 131
Figura 122 - Gráfico da sobreposição das curvas de porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de deformação. 132
Figura 123 - Exemplo de realização da avaliação da porcentagem de fratura dúctil quantitativa, feita pela medição da área de fratura plana utilizando como referência a figura da norma ASTM E23 (2012). 134
Figura 124 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (obtida a partir da área de fratura plana ou por clivagem) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material sem deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 135
Figura 125 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (obtida a partir da área de fratura plana ou por clivagem) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 4,5%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 135
Figura 126 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (obtida a partir da área de fratura plana ou por clivagem) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 8,6%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica. 136
Figura 127 - Gráfico da sobreposição das curvas de porcentagem de fratura dúctil (quantitativo) em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de deformação. 137
Figura 128 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a 66°C por técnica de microscopia eletrônica de varredura. 140
Figura 129 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -196°C por técnica de microscopia eletrônica de varredura. 141
Figura 130 – Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -2°C por técnica de microscopia eletrônica de varredura. 142
Figura 131 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a 21°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. A seta contínua indica uma

região de fratura dúctil, enquanto a seta tracejada indica uma região de fratura por clivagem. 143
Figura 132 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a 9°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. 143
Figura 133 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -11°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. 144
Figura 134 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -29°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. 144
Figura 135 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -49°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. 145

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 22

2 ESTUDO DA TENACIDADE DOS MATERIAIS METÁLICOS 27
2.1 O ensaio de impacto e sua utilização para estudo da tenacidade dos materiais 27
2.2 Efeito da geometria 35
2.3 Efeito da taxa de deformação 38
2.4 Posicionamento de retirada do corpo de prova e de confecção do entalhe 40
2.5 Histórico do desenvolvimento do ensaio de impacto Charpy 42
2.6 Resultados obtidos pelo ensaio de impacto 52
2.7 Abordagens para determinação da TTDF 54
2.7.1 Energia absorvida em função da temperatura. 56
2.7.2 Comparação das superfícies de fratura com faces de fratura mostradas como referência na norma ASTM E23 (2012). 57
2.7.3 Avaliação da área de fratura por clivagem. 58
2.7.4 Medição da expansão lateral do corpo de prova após ensaio de impacto. 61
2.8 O tratamento dos dados pelo método da "Tangente Hiperbólica" 62
2.9 Definições da TTDF 66
2.10 Revisão de dados disponíveis na literatura e avaliação da TTDF 69

3 MATERIAIS E MÉTODOS 98
3.1 Material Utilizado 98
3.2 Métodos 100

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 106
4.1 Análise Microestrutural 106
4.2 Ensaio de Tração 108
4.3 Ensaio de Impacto 109
4.3.1 Análise por critério de energia 109
4.3.2 Análise por critério da expansão lateral 113
4.3.3 Análise da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) 129

4.3.4 Análise da porcentagem de fratura dúctil (quantitativo)..... 133
4.4 Comparativo entre as TTDFs obtidas..... 138

5 CONCLUSÕES..... 147

APÊNDICE A 153

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os aços estruturais são materiais utilizados em praticamente todos os campos da construção e da indústria, como na geração de vapor, no circuito de fabricação do açúcar e do álcool, no armazenamento de ar comprimido nas indústrias, em instalações de usinas nucleares, nas construções civil, naval ou aeronáutica.

O interesse no estudo do comportamento dos materiais em função da temperatura iniciou-se na Segunda Guerra Mundial, quando se observou que no inverno alguns navios partiam-se ao meio, apresentando fratura frágil, tendo estes sido construídos com juntas soldadas de materiais com boa ductilidade, quando ensaiados em temperatura ambiente. A ocorrência deste tipo de falha também foi verificada em linhas de tubulação de petróleo, vasos de pressão e pontes de estrutura metálica (GARCIA et al., 2008, p.154).

Diante desse contexto, torna-se então uma das principais preocupações dos pesquisadores, e também dos engenheiros de aplicação dos materiais, prever em quais condições provavelmente uma fratura frágil ocorrerá, já que este é um tipo de colapso que ocorre abruptamente, não sendo possível esperar que se inicie para que então alguma providência seja tomada.

A Figura 1 traz um exemplo de fratura catastrófica de um navio ainda aportado em águas consideradas “geladas”, mostrando a gravidade que este tipo de falha representa para a sociedade e a economia, e deste modo percebe-se que o contínuo estudo do comportamento dos materiais utilizados se faz necessário, de forma a garantir sua integridade estrutural e consequentemente a segurança em sua utilização.

O episódio dos navios de classe Liberty na 2ª Guerra Mundial, quando navios atracadados apresentavam fratura frágil similar à condição mostrada na Figura 1, sem razão aparente e que surgiam de maneira totalmente inesperada, trouxe à tona a necessidade de determinar uma temperatura limite, abaixo da qual o comportamento à fratura do material se altera de dúctil para frágil, de maneira a prever e evitar ocorrências de fratura frágil catastrófica. A essa temperatura se deu o nome de Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (TTDF) dos materiais. Entretanto, em certo momento surgiu a necessidade de encontrar uma alternativa que pudesse substituir os caros ensaios destrutivos que simulavam as condições de falha dos componentes em condições reais (HERTZBERG, 1995, p. 375). Atualmente, pode-se utilizar a afirmação de Horath (1995, p. 281) para auxiliar nesta definição. Este autor diz que há 4 considerações principais que devem ser feitas no momento de selecionar o tipo de

ensaio a realizar, que são: o propósito do teste, a precisão desejada para o teste, qual equipamento disponível é mais simples, e ainda qual é o mais econômico. Além disso, é importante considerar as propriedades do material e lembrar das condições de uso às quais este material será submetido para então definir o teste mais apropriado a realizar.

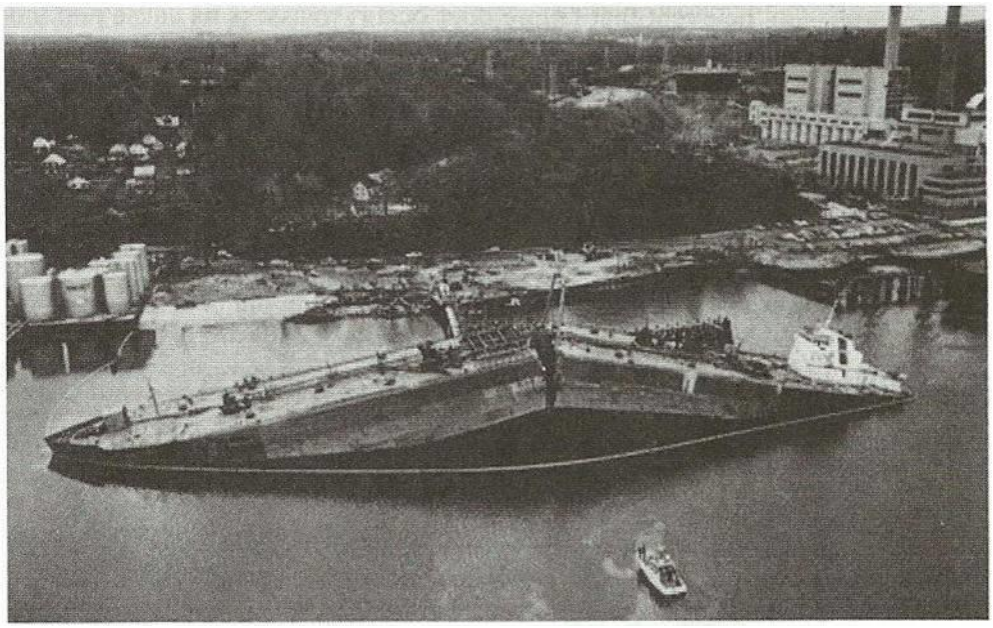


Figura 1 - Navio com ruptura frágil devido à fragilização do material

Fonte: Callister, 2005, p. 282

Na época da Segunda Guerra, entretanto, muito pouco sobre o assunto havia sido documentado e, dentre os ensaios disponíveis, o ensaio de impacto Charpy foi então considerado o ensaio que mais se adequava às necessidades para o estudo deste assunto, e permanece até hoje com ampla utilização para este fim. Levantando-se os dados de absorção de energia de um material metálico de estrutura cristalina CCC, em diversas temperaturas, pode-se determinar a TTDF deste material. Usualmente, vê-se que ocorrem dois patamares de energia absorvida, chamados de “patamar inferior” e “patamar superior”, e uma região entre eles, chamada de “zona de transição”, conforme apresentado na Figura 2.

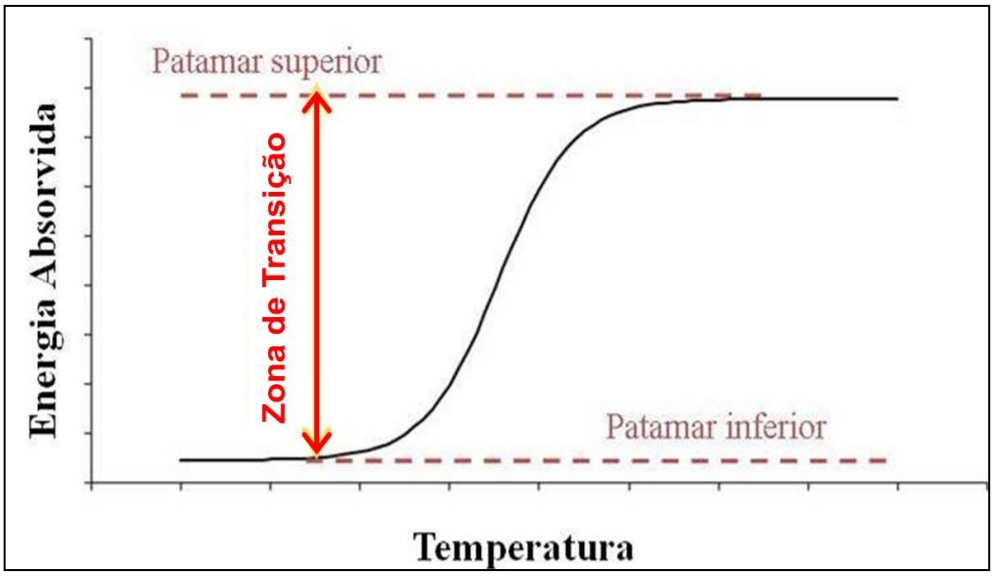


Figura 2 - Gráfico genérico de energia absorvida x temperatura obtido pelo ensaio de impacto Charpy.

Fonte: Autora

Sabe-se, portanto, que em temperaturas correspondentes ao patamar inferior de absorção de energia, o material apresentará fratura predominantemente frágil, enquanto que em temperaturas correspondentes ao patamar superior de absorção de energia, o material apresentará fratura predominantemente dúctil. Difícil tarefa, entretanto, é determinar a TTDF, que será uma temperatura de referência para a mudança de comportamento à fratura do material, de dúctil para frágil, com a diminuição da temperatura. A Figura 3 mostra um material metálico ensaiado a 4 diferentes temperaturas por ensaio de impacto Charpy. É possível verificar que a face de fratura se apresenta de maneiras diferentes, variando de uma fratura de aspecto 100% brilhante para 100% opaco, sendo esta uma caracterização feita exclusivamente pela observação visual da face de fratura, tornando possível estabelecer uma temperatura a partir da qual a mudança no micromecanismo de fratura ocorre.

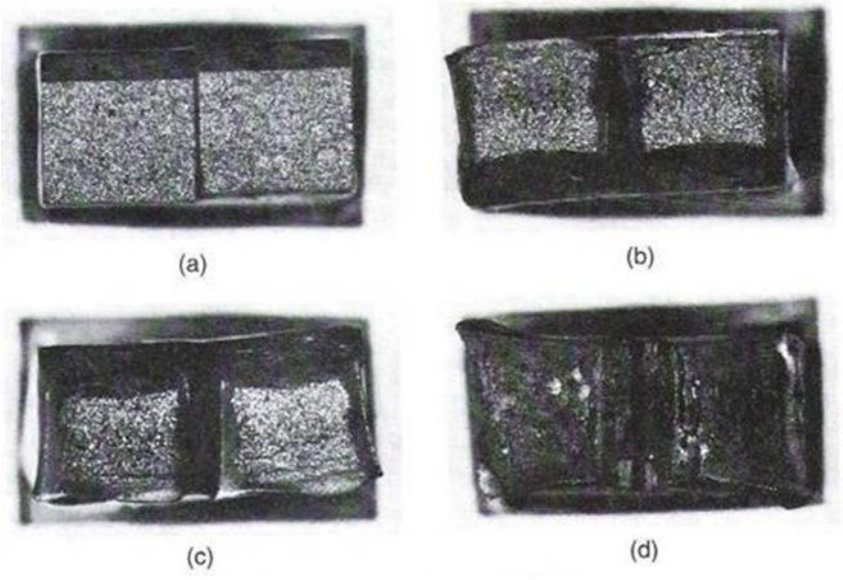


Figura 3 - Faces de fratura de um material metálico ensaiado por ensaio de impacto Charpy a diversas temperaturas, sendo T(a) < T(b) < T(c) < T(d)

Fonte: Meyers e Chawla, 1999, p.435

Entretanto, seria necessário um critério adequado para definir a TTDF, pois somente pela avaliação desses corpos de prova fraturados, uma determinação adequada seria difícil na prática experimental.

Para isso, pode-se utilizar a metodologia indicada na norma ASTM E23 (2012), que é a norma de execução do ensaio de impacto. Entretanto, o método de comparativo visual descrito na norma é bastante impreciso, pois as fotografias a serem utilizadas para comparação com as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados apresentam pouca qualidade, tornando a comparação difícil e com grande possibilidade de erros. Desta forma, a aplicação de outras metodologias para determinação da TTDF se faz importante. No método mais simples, a TTDF é determinada a partir da curva de energia absorvida em função da temperatura, e um critério possível neste cenário é considerar que a TTDF é a temperatura onde se atinge a média de energia entre os patamares superior e inferior da curva.

Diante deste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a determinação da TTDF utilizando suas várias definições, e realizar um estudo comparativo entre elas. Será utilizado o aço ASTM A-36 (2008), em três graus de deformação (condição como recebida, com 4,5% e 8,6% de deformação longitudinal uniaxial), por ser um aço estrutural de ampla utilização.

Corpos de prova tipo A foram confeccionados para ensaio de impacto Charpy conforme norma ASTM E23 (2012). Diferentes temperaturas de ensaio foram utilizadas, visando abranger desde as temperaturas para as quais se espera que o material de interesse

apresente fratura 100% frágil até as temperaturas para as quais ocorre fratura 100% dúctil, possibilitando a determinação da TTDF utilizando diferentes metodologias.

2 ESTUDO DA TENACIDADE DOS MATERIAIS METÁLICOS

Devido à complexidade e aos diversos fatores que impactam nos resultados obtidos no ensaio de impacto, nesta seção encontram-se subseções descrevendo cada condição relevante que influencia os resultados deste ensaio, as diferentes informações que podem ser obtidas pela realização do ensaio de impacto, assim como um histórico do desenvolvimento do ensaio de impacto Charpy, as diversas abordagens para definição da TTDF e uma revisão de dados disponíveis na literatura, ilustrando as diferentes utilizações do ensaio de impacto Charpy.

2.1 O ensaio de impacto e sua utilização para estudo da tenacidade dos materiais

A separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes, pela ação de um esforço, é chamada “fratura” (MEYERS; CHAWLA, 1999, p. 326), e a capacidade de absorver energia até que essa fratura ocorra é a tenacidade do material que constitui este corpo sólido. Em termos de solicitações estáticas, a tenacidade de um material pode ser avaliada por meio de um gráfico de tensão em função da deformação obtido por ensaio de tração (Figura 4), correspondendo à área abaixo da curva até seu ponto de fratura.

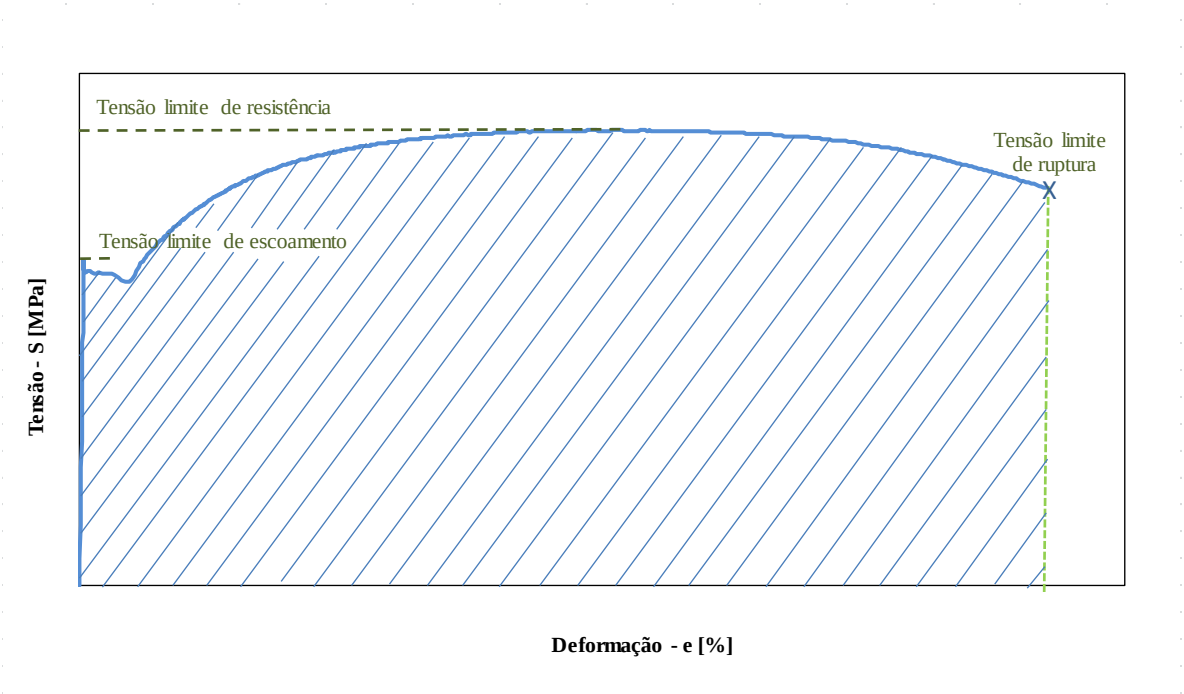


Figura 4 - Curva tensão em função da deformação e indicação da área abaixo da curva, evidenciando o módulo de tenacidade do material ensaiado.

Fonte: Autora

O ensaio de tração, entretanto, não mostra a resposta do material em condições de impactos abruptos, ou de elevadas taxas de deformação, já que há materiais cujas propriedades são diferentes, dependendo da taxa de deformação aplicada. Se uma carga muito menor for aplicada repentinamente, o que caracteriza uma solicitação dinâmica ou um teste dinâmico, o material pode falhar e aparentar ter menor resistência do que teria caso a mesma carga fosse aplicada de forma gradativa (HORATH, 1995, p. 356). Sendo assim, considerando que o desempenho de alguns materiais é diretamente dependente da maneira como se aplica a carga, para situações de solicitações dinâmicas o ensaio de impacto é amplamente utilizado, particularmente quando há a necessidade de se estudar o comportamento dos materiais na transição do comportamento de fratura com micromecanismo dúctil para frágil, como função da temperatura (GARCIA et al. 2008, p. 156). Isso se dá também, pois, dentre suas vantagens, está o baixo custo e a relativa simplicidade na realização do mesmo (SILVA, 1998).

Askeland e Phulé (2006, p. 212) também comentam que o ensaio de impacto é uma maneira rápida, conveniente e barata para comparar diferentes materiais, e justificam isso lembrando que nem sempre o valor de energia necessário para ruptura de um material, quando solicitado por tração, é o mesmo valor de energia requerido para ruptura de um material ensaiado por impacto. Além disso, citam que, em geral, é verdade que metais que apresentam alta resistência e alta ductilidade no ensaio de tração apresentam boa tenacidade, mas que isso deixa de ser verdade absoluta quando são consideradas altas taxas de deformação, como é o caso apresentado pelo ensaio de impacto.

Basicamente, o ensaio consiste em promover a queda de um pêndulo de uma altura conhecida sobre a peça que se quer ensaiar. Um desenho esquemático do aparato experimental para ensaio de impacto encontra-se na Figura 5.

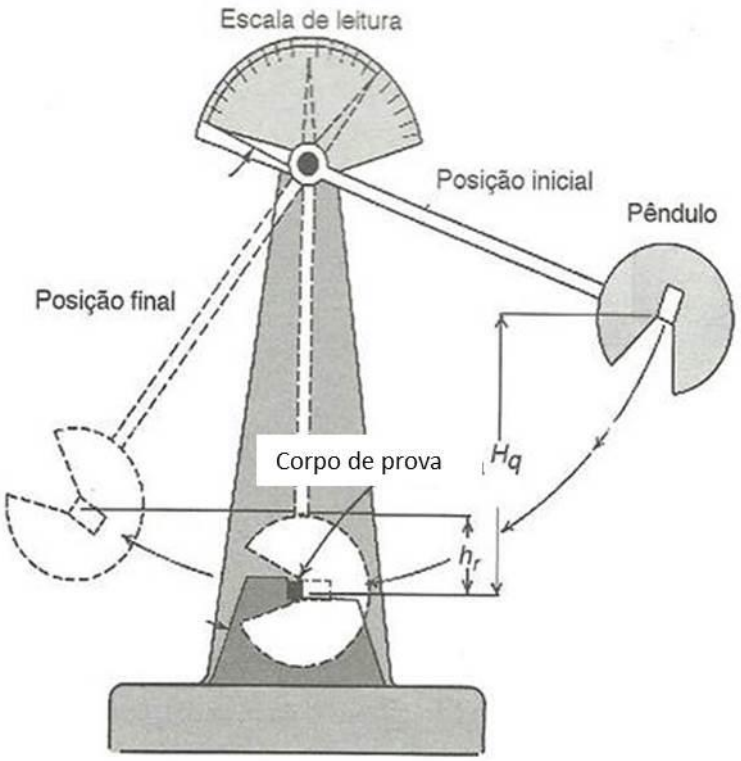


Figura 5 - Equipamento para ensaio de impacto.
Fonte: Garcia et al., 2008, p. 155

O pêndulo é liberado de uma altura conhecida - ‘posição inicial’ da Figura 5 – e se choca com o corpo de prova. Após este choque, o pêndulo sobe novamente até uma altura menor que a inicial – ‘posição final’ indicada na Figura 5.

Garcia et al. (2008) comentam que apesar da praticidade e das vantagens do ensaio de impacto, é preciso atentar à padronização do corpo de prova, por motivos que serão esclarecidos a seguir, e às condições do ensaio, sendo elas um suporte rígido para apoio do corpo de prova, um pêndulo de massa conhecida e um dispositivo de escala para medir as alturas de soltura do pêndulo e sua altura posteriormente ao impacto com o corpo de prova. Esses requisitos são essenciais para garantir a reprodutibilidade do ensaio. Fazendo isso, quando se ensaiam diversos materiais sob as mesmas condições do ponto de vista da execução do ensaio, será possível então comparar as características desses materiais com a certeza de que não há outras interferências nos resultados obtidos. Horath (1995, p. 358) acrescenta que a fundação da máquina, as características do martelo e a velocidade de soltura também são itens que devem ser devidamente padronizados. O mesmo autor também diz que, no sistema de soltura da massa que atingirá o corpo de prova, não deve haver movimentação lateral do pêndulo, nem vibração que possa gerar perda de energia, e o martelo deve ser pesado o suficiente para que eventuais perdas de energia que ocorram no sistema, e que não sejam

desprezíveis, não sejam suficientes para invalidar o ensaio por não permitirem a quebra do corpo de prova.

Horath (1995, p. 356) diz que para entender o que ocorre no ensaio de impacto é necessário analisar o ensaio do ponto de vista da transferência, absorção e dissipação de energia. Isso se justifica, pois a diferença entre as alturas inicial e final do pêndulo pode ser relacionada à quantidade de energia absorvida pelo corpo de prova, conforme o princípio de conservação de energia. O mesmo autor comenta ainda que pode ocorrer deformação plástica dos elementos do sistema, e por consequência do efeito de histerese nas partes, fricção entre os elementos que interagem entre si e efeitos de inércia das partes móveis, podem ocorrer perdas de energia ao sistema.

Davim e Magalhães (2004) representam o equilíbrio de energias citado anteriormente com a Equação (1), na forma:

$$E_m = E_c + E_p + E_{perdas}, \qquad (1)$$

onde E_m é a energia mecânica envolvida no ensaio, E_c é a energia cinética, E_p é a energia potencial e E_{perdas} é a energia perdida por energia calorífica dissipada, energia elástica absorvida pela máquina, sendo esta última normalmente desprezível. Sendo assim, considerando que a energia mecânica do sistema será constante, ou seja, a energia mecânica inicial do sistema será a mesma que a sua energia mecânica final, matematicamente é o mesmo que escrever a Equação (2).

$$E_{mInicial} = E_{mFinal}. \qquad (2)$$

Utilizando a Figura 6 como referência, pode se utilizar o curso que o pêndulo realiza desde o momento da sua soltura, passando pelo impacto no corpo de prova até o ponto mais alto atingido antes de iniciar o movimento de retorno, que é a sua altura máxima final, para avaliar as condições de energia que ocorrem durante o ensaio.

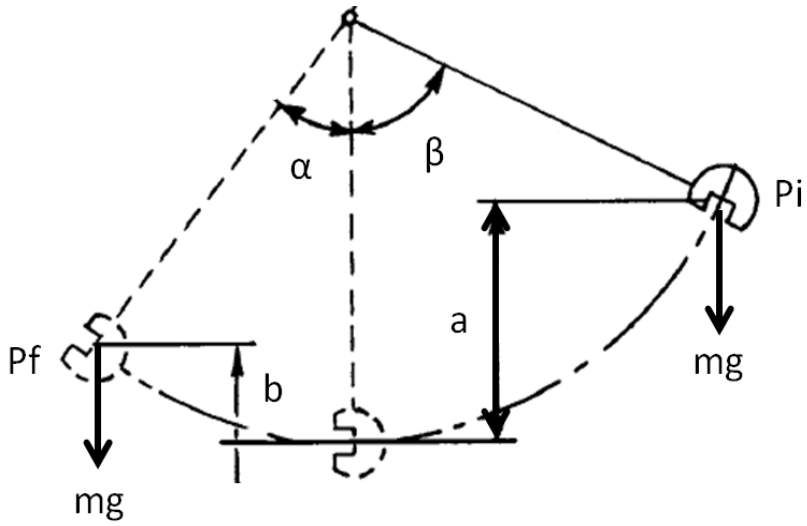


Figura 6 - Representação esquemática do percurso que o pêndulo percorre durante o ensaio de impacto.
Fonte: Autora

Considerando a posição inicial *Pi* da Figura 6, no momento exatamente anterior à soltura do pêndulo, tem-se que a Energia Mecânica do sistema quando o pêndulo encontra-se neste ponto equivale à máxima energia potencial e energia cinética nula, podendo portanto ser expressa pela Equação (3):

$$E_{mInicial} = m * g * a, \quad (3)$$

sendo m a massa utilizada no pêndulo em kg, g a aceleração da gravidade em m.s^{-2} e a a altura da queda, em m.

Já quando o pêndulo encontra-se no ponto Pf, a energia do sistema é a energia potencial existente no pêndulo descontada a energia absorvida pelo corpo de prova no momento do impacto, E_a, e desprezando as perdas do sistema, gera-se a Equação (4):

$$E_{mFinal} = m * g * b = m * g * a - E_a \, . \quad (4)$$

Substituindo as Equações (3) e (4) na Equação (2), obtém-se que a energia absorvida pelo corpo de prova equivale à energia perdida pelo pêndulo no momento do impacto, que se revela pela sua perda de altura. Matematicamente, portanto, obtém-se:

$$E_a = m * g * (a - b) \quad (5)$$

sendo $(a - b)$ a diferença de alturas que o pêndulo apresenta.

Quando se fala da utilização do ensaio de impacto Charpy para avaliação de tenacidade e determinação da TTDF de um material, fala-se da avaliação do modo de falha do material a diversas temperaturas, ou seja, deseja-se verificar se a falha ocorre de forma dúctil ou frágil a uma determinada temperatura. Lembrando que a fratura frágil é o modo mais crítico de falha, pois ocorre de maneira abrupta, objetiva-se utilizar o material a uma determinada condição onde isso não ocorra. Portanto, é necessário entender quando este tipo de fratura pode ocorrer para então poder evitá-la.

Garcia et al. (2008) citam que três são os fatores principais que contribuem para o surgimento da fratura frágil em materiais que normalmente são dúcteis à temperatura ambiente: a existência de um estado triaxial de tensões, baixas temperaturas e taxa de deformação elevada. A existência do entalhe no corpo de prova padronizado, a possibilidade de ensaiar materiais a diversas temperaturas e o maquinário que permite que a carga seja aplicada no material de maneira abrupta, fazem do ensaio Charpy um dos mais utilizados no estudo deste assunto.

O entalhe no corpo de prova gera um estado triaxial de tensões, por se tratar de um concentrador de tensões. Sem o entalhe, o corpo de prova deformaria plasticamente, e poderia não quebrar, o que invalidaria o ensaio (HORATH, 1995, p. 358). Mostra-se na Figura 7 os três tipos diferentes de entalhe que podem ser utilizados no ensaio de impacto Charpy segundo a norma ASTM E23 (2012), e na Figura 8 a forma com a qual esse corpo de prova é apoiado para que o pêndulo o atinja durante o ensaio. Cabe comentar que o corpo de prova tipo A é o mais utilizado, uma vez que o entalhe em “V” deste tipo de corpo de prova cria uma condição mais crítica de ensaio.

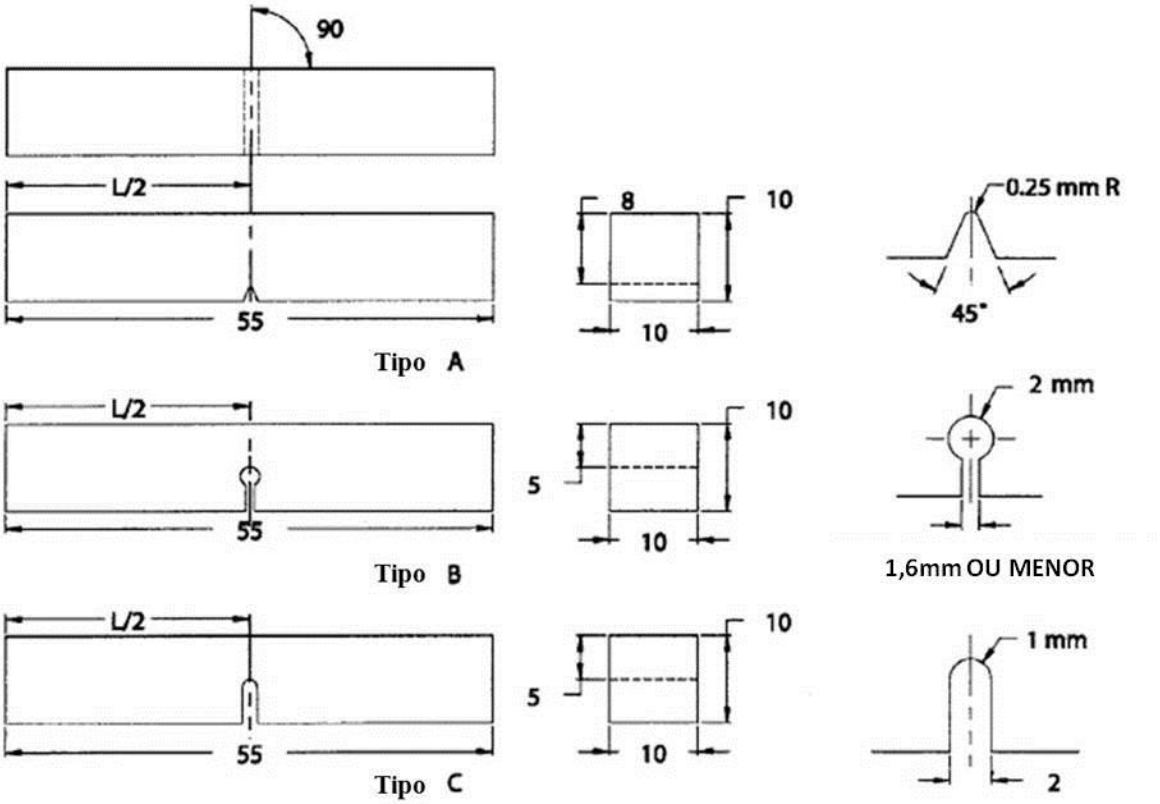


Figura 7 - Formatos de corpo de prova para ensaio de impacto apresentados na norma ASTM E23.
Fonte: Garcia et al., 2008, p. 162

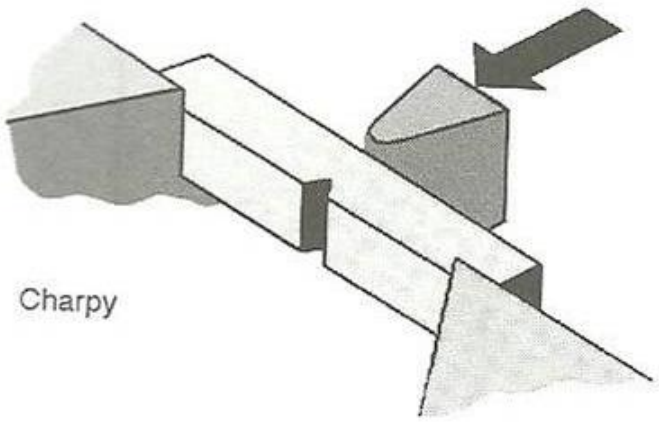


Figura 8 – Posicionamento de um corpo de prova tipo A para ensaio de impacto Charpy.
Fonte: Garcia et al., 2008, p. 157

A concentração de tensões gerada pela utilização do entalhe em um corpo de prova confeccionado para realização de ensaio de impacto Charpy gera diferentes resultados quando se comparam diferentes estruturas cristalinas dos materiais. Callister (2002) comenta que materiais de estrutura CFC, como a fase austenítica da matriz de aços inoxidáveis

austeníticos, permanecem dúcteis mesmo em temperaturas extremamente baixas, porém os materiais de estrutura CCC, como a fase ferrítica dos mesmos aços, apresentam este tipo de transição. Garcia et al. (2008), por sua vez, apresenta o gráfico da Figura 9, comparando um aço inoxidável de estrutura CFC e um aço 0,6% de carbono cuja estrutura cristalina é CCC, para evidenciar a diferença no comportamento do material quanto à transição dúctil-frágil, considerando o efeito da temperatura no comportamento do material. Meyers e Chawla (1999, p. 241) justificam esse efeito comentando que, com o aumento da temperatura ocorre também um aumento na amplitude de vibração dos átomos do material, embora a frequência seja mantida, causando a dilatação térmica. Com isso, alteram-se o posicionamento atômico e as forças interatômicas atuantes. Sabendo-se que a fratura ocorre pelo distanciamento dos átomos do material até um ponto crítico a partir do qual as forças de ligação atômicas não são suficientes para mantê-los ligados, se há alteração nesse equilíbrio de forças, haverá também alteração no comportamento do material quanto à sua ruptura.

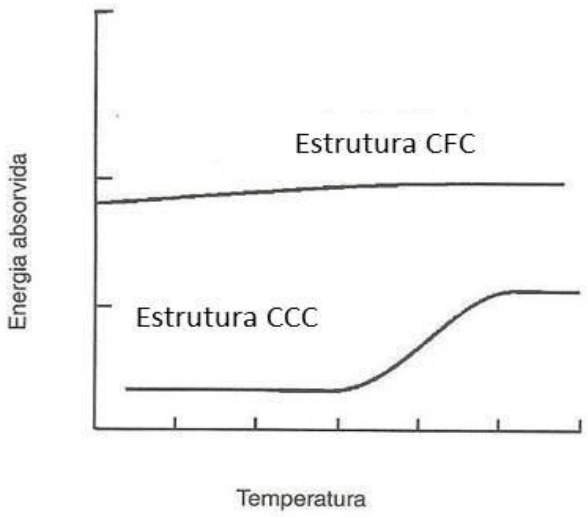


Figura 9 – Curvas características de energia absorvida em função da temperatura para materiais com diferentes estruturas cristalinas

Fonte: Garcia et al., 2008, p. 158

Além do efeito da estrutura cristalina do material, há outras condições que impactam diretamente nos resultados obtidos no ensaio de impacto, os quais serão relatados a seguir.

2.2 Efeito da geometria

As dimensões do corpo de prova, a forma e o tamanho do entalhe utilizados determinam um dado estado de tensões que não se distribui de modo uniforme por todo o corpo de prova. As Figuras 10 e 11 mostram como ocorre essa distribuição de tensões no material devido a um concentrador de tensões existente para os estados plano de tensão e plano de deformação, respectivamente.

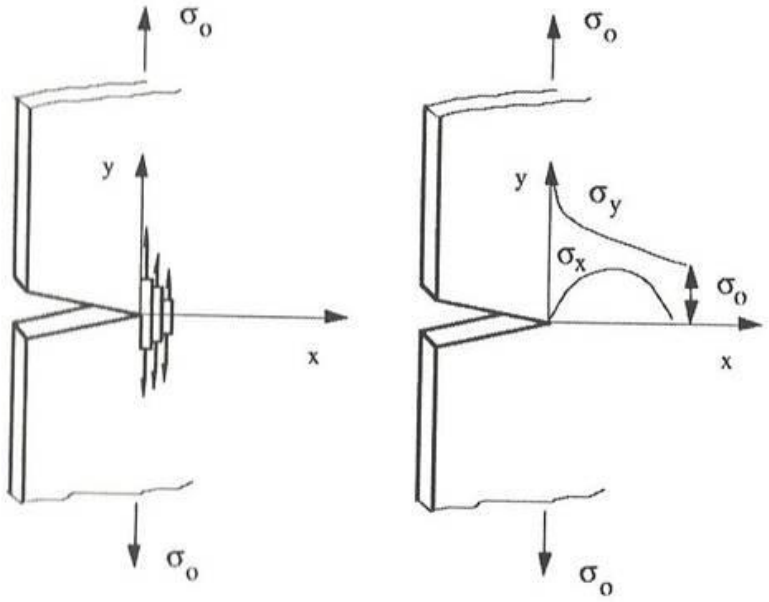


Figura 10 - Distribuição elástica de tensões para estado plano de tensão (supondo desprezível a espessura).

Fonte: Davim e Magalhães, 2004, p. 124

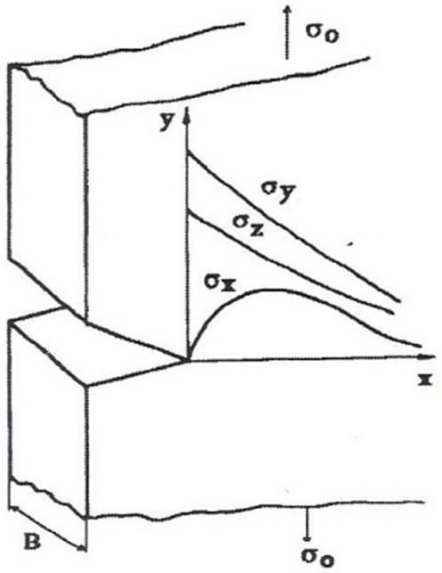


Figura 11 - Distribuição elástica de tensões para estado plano de deformação.
Fonte: Davim e Magalhães, 2004, p. 125

No caso do entalhe utilizado no ensaio de impacto Charpy, a tensão transversal na base do entalhe depende da relação entre a largura na parte entalhada do corpo de prova e do raio do entalhe. Quanto maior for esta relação, maior será a tensão transversal. Sobre isso, Askeland e Phulé (2006, p. 212) justificam que o tamanho do corpo de prova impacta nos resultados obtidos no ensaio de impacto, pois uma vez que é mais difícil para um material espesso se deformar, sua ruptura ocorre com menor absorção de energia, o que caracteriza menor tenacidade. Por isso, esse ensaio não fornece um valor quantitativo da tenacidade do material: ele representa apenas a tenacidade para um dado estado de tensões, causado pela geometria do entalhe e do corpo de prova utilizados. Sendo assim, a forma do entalhe, bem como a temperatura, o tipo de material ensaiado e as dimensões do corpo de prova utilizado devem ser fornecidos juntamente com as respostas do ensaio, pois são fatores relevantes do mesmo.

Hertzberg (1996, p. 289) comenta a influência do entalhe (ou de um concentrador de tensões qualquer) ressaltando que a diferença de comportamento de um material muito dúctil para um material pouco dúctil se dá em relação à deformação que ocorre na ponta de um entalhe. Quando a zona plástica é pequena, a tenacidade do material é baixa, e o material é classificado como frágil. Por outro lado, quando a plasticidade ocorre numa extensão grande longe da ponta da trinca, a energia para que haja a fratura é alta, e o material pode deformar plasticamente, sendo necessário grande esforço para romper esta região plástica. A Figura 12

mostra a diferença entre os materiais, para um exemplo de placa plana com trinca central, e a região de deformação plástica existente entre eles, conforme discutido por Hertzberg (1996, p. 289).

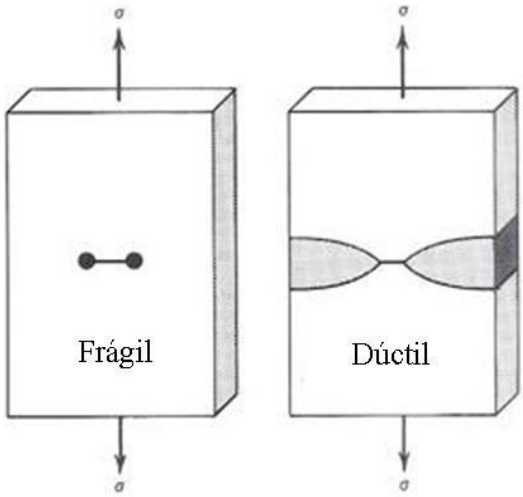


Figura 12 - Extensão de zona plástica caracterizando ocorrência de fraturas dúctil e frágil num corpo de prova que apresente uma trinca central.
Fonte: Hertzbert, 1995, p. 289

Hertzberg (1996, p. 387) mostra também a influência das dimensões do corpo de prova nos resultados dos ensaios de impacto Charpy, através de um comparativo sobre os resultados de energia absorvida e de porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura de ensaio, o que tem influência sobre a determinação da zona de transição e portanto da TTDF do aço em questão. Vê-se no gráfico da Figura 13 que para o mesmo material, seu comportamento é modificado tanto considerando a energia absorvida quanto a porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura conforme ocorre a mudança na espessura do corpo de prova.

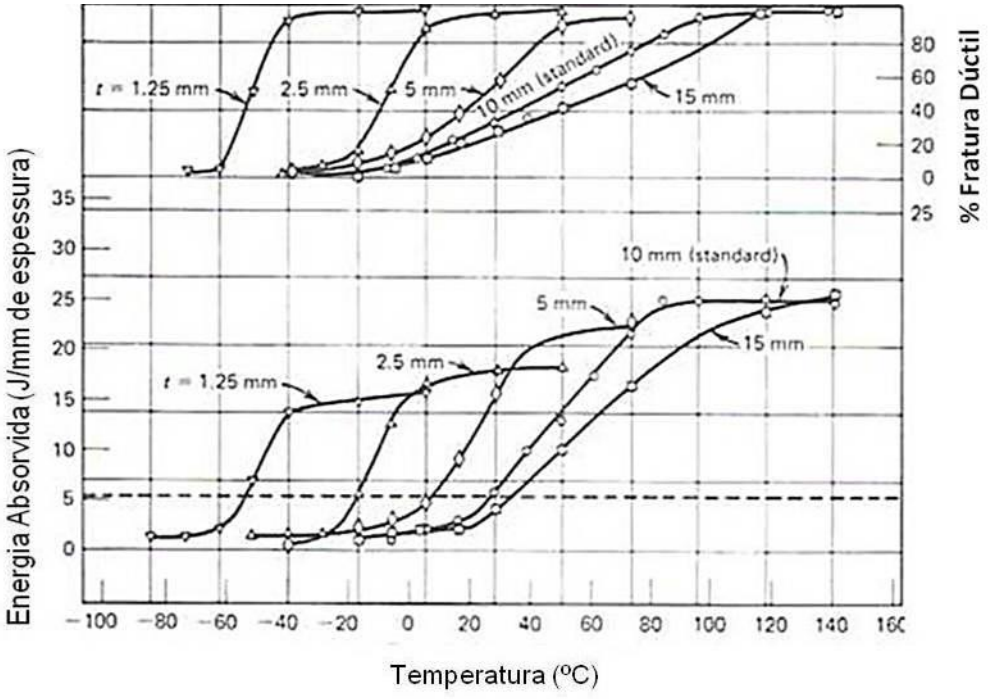


Figura 13 - Curvas de energia absorvida e porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura para corpos de prova do aço A-283 testados com diversas espessuras.

Fonte: Hertzberg, 1996, p. 387

Askeland e Phulé (2006, p. 212) também comentam sobre a influência do entalhe na tenacidade do material, e acrescentam que além da presença do entalhe, é importante também atentar à qualidade da usinagem deste entalhe, uma vez que esta operação, se realizada grosseiramente, pode resultar numa condição ainda mais crítica quanto à concentração de tensões, o que pode ser extremamente crítico para materiais que apresentem grande sensibilidade ao entalhe.

2.3 Efeito da taxa de deformação

Hertzberg (1996, p. 375) comenta que uma primeira aproximação para avaliar o quanto um material tem suas propriedades alteradas pela existência de um entalhe e pela taxa de deformação pode ser estimada utilizando resultados de ensaio de tração desses materiais, utilizando corpos de prova entalhados e diversas taxas de deformação na realização do ensaio. Quando a taxa de deformação é baixa, o estado biaxial ou triaxial de tensões que é criado na ponta do entalhe eleva a curva tensão-deformação, permitindo uma tensão maior do que ocorreria em um corpo de prova sem entalhe. A Figura 14 mostra a diferença entre as curvas tensão-deformação obtidas para os materiais nas diversas condições. No caso de materiais que

apresentam pouca capacidade de deformação plástica, o entalhe aumenta a tensão local em níveis tão altos que a deformação plástica nem mesmo ocorre, propiciando a ocorrência de fratura frágil, como mostra a Figura 15.

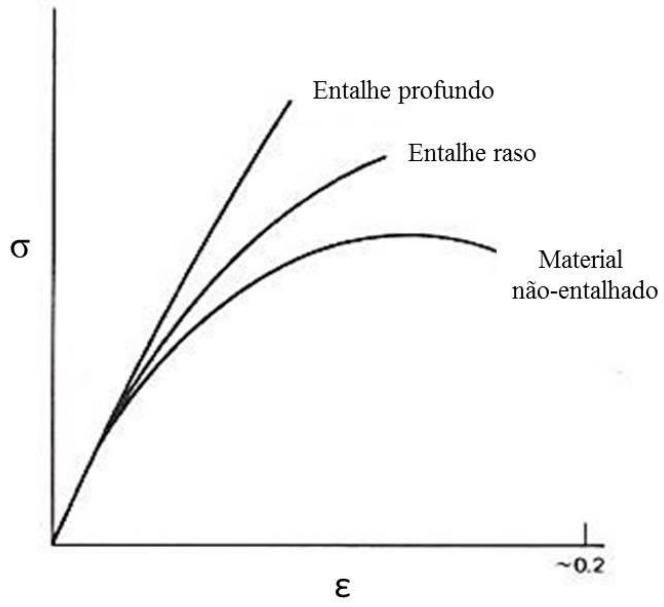


Figura 14 - Exemplo de como a curva tensão-deformação de um material pode ser alterada pela utilização de entalhe no corpo de prova.

Fonte: Hertzberg, 1996, p. 376

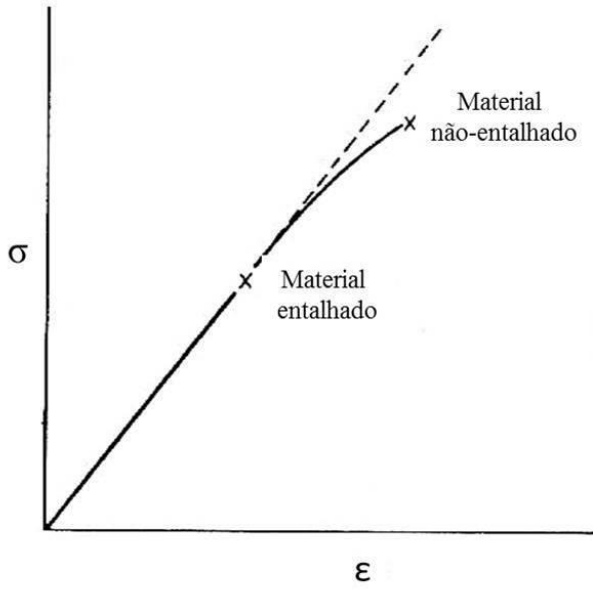


Figura 15 - Exemplo de que a inserção de um entalhe propicia a ocorrência de fratura frágil em materiais com pouca capacidade de deformação plástica.

Fonte: Hertzberg, 1996, p. 376

Comentado isso, Hertzberg (1996, p. 375) também cita que o ensaio de impacto Charpy representa uma condição mais severa de utilização do material, já que o corpo de prova entalhado é submetido a uma altíssima taxa de deformação, pois precisa absorver o impacto da queda do pêndulo. Além disso, este ensaio ainda permite a sua realização a diversas temperaturas, aumentando ainda mais a severidade do teste.

Para ilustrar o efeito da taxa de deformação, Hertzberg (1996, p. 393) cita que o material ASTM A36 pode ter sua temperatura de transição reduzida em 89°C se a taxa de deformação for alterada, embora não diga de quanto foi essa alteração na taxa.

Minami et al. (2002) analisaram o estado de tensões de corpos de prova entalhados para ensaio de impacto Charpy em aços estruturais de alta resistência. Por meio de análise pelo Método dos Elementos Finitos, obtiveram a taxa de deformação em vários pontos, a partir da ponta do entalhe. A Figura 16 traz esse gráfico para dois aços a duas temperaturas diferentes, que mostra que esta taxa é extremamente alta na ponta do entalhe, reduzindo-se substancialmente ao se distanciar do concentrador de tensões.

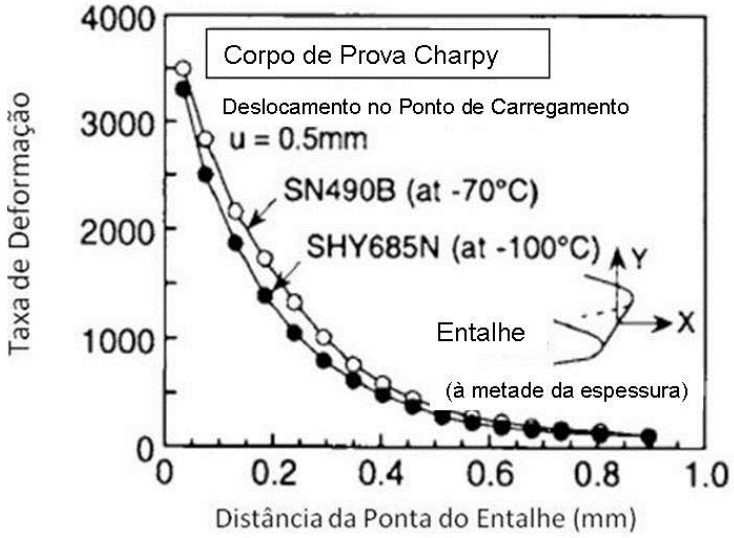


Figura 16 - Taxa de deformação obtida em corpos de prova entalhados para ensaio de impacto Charpy, a diversas distâncias da ponta do entalhe.

Fonte: Minami et al., 2002

2.4 Posicionamento de retirada do corpo de prova e de confecção do entalhe

Ainda sobre o corpo de prova, cabe também comentar que a posição de retirada deste corpo de prova e o posicionamento do entalhe também impactam nos resultados obtidos, pois

também alteram o estado de tensões ao qual o corpo de prova será submetido. São indicadas na Figura 17 três possibilidades de retirada e posicionamento do entalhe em corpos de prova para ensaio de impacto Charpy de uma chapa laminada.

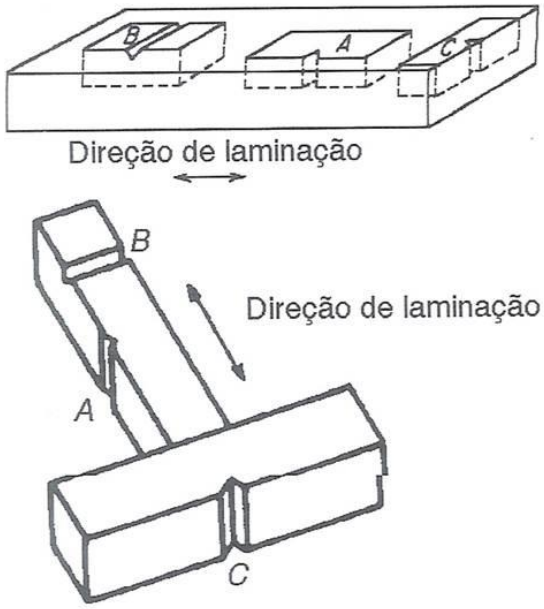


Figura 17 – Possibilidades de posicionamento para retirada do corpo de prova do ensaio Charpy e localização do entalhe.

Fonte: Garcia et al., 2008, p. 164

Utilizando corpos de prova de aço baixo carbono laminado a frio ensaiados ao impacto como exemplo, obtêm-se as curvas de energia absorvida em função da temperatura mostradas na Figura 18.

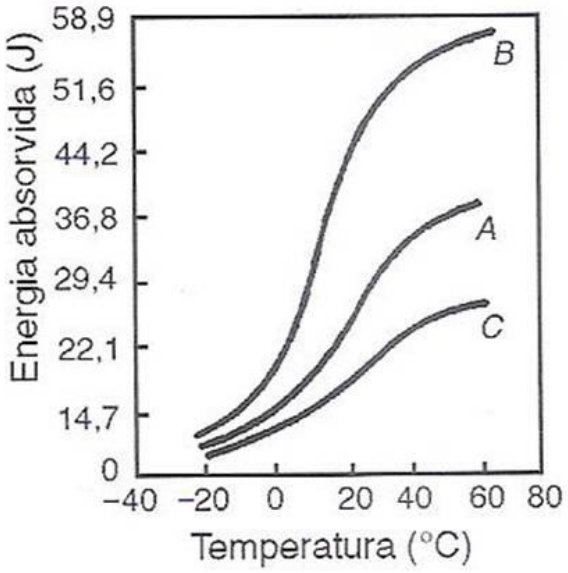


Figura 18 – Comparativo entre 3 condições diferentes, quanto ao direcionamento de retirada e confecção do entalhe do corpo de prova para ensaio Charpy, de aço baixo carbono laminado a frio.
Fonte: Garcia et al., 2000, p. 164

No corpo de prova C, o entalhe está perpendicular ao sentido de laminação (e ao fibramento microestrutural consequente), sendo portanto a pior condição de absorção de energia, enquanto que o corpo de prova B encontra-se orientado transversalmente às fibras do material, o que favorece a condição de absorção de energia. O corpo de prova A, entretanto, também apresenta entalhe que corta as fibras transversalmente, mas atravessa o núcleo da chapa, apresentando uma condição intermediária de absorção de energia. Davim e Magalhães (2004, p. 122) comentam que esta diferença de comportamento se dá por conta da anisotropia apresentada por alguns materiais, principalmente quando submetidos a deformação mecânica durante sua fabricação.

2.5 Histórico do desenvolvimento do ensaio de impacto Charpy

Até a definição dos padrões de ensaio discutidos anteriormente, entretanto, um longo caminho foi percorrido pelos estudiosos.

Embora o uso efetivo do ensaio de impacto tenha ocorrido após a Segunda Guerra devido ao episódio dos navios da classe Liberty, antes disso o ensaio de impacto já havia sido relatado por Russel (1898) de maneira parecida com o que é conhecido atualmente.

Tóth et al. (2002) relatam que o interesse na caracterização do comportamento dúctil ou frágil dos materiais se deu ainda no início do Século XIX, pois um grande número de

falhas ocorreram nos trilhos das estradas de ferro localizadas nas cidades industriais nesse período. Falhas inesperadas e inexplicáveis até então continuaram ocorrendo entre 1840 e 1860, causando acidentes catastróficos, uma vez que não havia deformação aparente que anunciasse falha iminente do componente. Tornou-se então prioridade evitar, ou ao menos limitar e controlar essas falhas inesperadas. Lembrando da Revolução Industrial que ocorria neste período, a utilização do aço como material para construção aumentou vertiginosamente (de 20% para 80% de todo o material utilizado na época), e surgiram então duas grandes necessidades: conhecer o comportamento dos metais nas mais diversas aplicações, e unificar os métodos de caracterização deles, de forma a definir critérios de aceitação desses materiais.

Russel (1898) descreveu em seu trabalho não apenas seus resultados de ensaios de materiais ao impacto, mas os diversos tipos de corpos de prova utilizados com justificativas e descrições para as diferentes aplicações de cada um, a descrição dos diversos materiais utilizados para verificar a aplicação do teste a cada caso, e também como deveria ser a máquina para realização desses ensaios, o que era o principal objetivo do seu trabalho, que foi nomeado como “Experiments with a New Machine for Testing Materials by Impact”. Este trabalho foi apresentado na American Society of Civil Engineers, e considerado na época como algo pioneiro que traria conhecimento diferenciado a toda a comunidade científica.

Apesar de não ter sido o primeiro a tratar do assunto, G. Charpy passou a ter seu nome atribuído ao ensaio na primeira metade dos anos 1900, devido à sua contribuição e empenho para o desenvolvimento de um procedimento que tornasse este ensaio uma robusta ferramenta de engenharia. Charpy (1901) citou em seu trabalho várias metodologias anteriormente utilizadas para realização do ensaio de impacto, incluindo a utilizada por Russel (1898), comentando suas principais diferenças, e então comentando que a comparação dos resultados obtidos pelos diferentes estudiosos não seria possível, uma vez que não havia reprodutibilidade do ensaio. Iniciou, então, a discussão de como mudanças nas variáveis do ensaio afetaria seu resultado, a partir dos resultados obtidos em seus ensaios de impacto em diversas condições. Após a realização dos ensaios em materiais com e sem entalhe, Charpy comparou os resultados com ensaios de tração, até então o ensaio mais utilizado para caracterização dos materiais.

Tóth et al. (2002), relatam que apenas em 1905 Charpy trouxe à comunidade científica a proposta de uma máquina, significativamente similar àquela que é utilizada nos dias atuais, que tornasse possível a realização do ensaio de impacto de maneira padronizada, e a partir deste ano começa-se a encontrar as referências “Ensaio Charpy” e “Método Charpy” na

literatura sobre o assunto. Em 1906 Charpy tornou-se responsável pelas atividades referentes ao ensaio de impacto realizadas pela International Association for Testing of Materials (IATM), e presidiu discussões visando estabelecer um procedimento suficientemente reprodutível que pudesse se tornar um ensaio padrão. A importância da geometria do entalhe (profundidade e raio do entalhe principalmente), da velocidade de impacto, do tamanho do corpo de prova, das condições de maquinário necessárias para o teste e as possibilidades de aplicação prática do ensaio foram temas longamente discutidos a partir de 1906.

Enquanto os detalhes que posteriormente envolveriam este procedimento experimental eram mundialmente discutidos (inúmeros fóruns de discussão foram estabelecidos para este fim), o ensaio Charpy já era utilizado e se mostrava adequado para reduzir os riscos de falha de componentes em serviço. Em 1912, empresas em Liege e Jeumont realizaram mais de 10.000 ensaios de impacto por mês. A partir dos resultados obtidos, verificou-se a relação de algumas características dos materiais, como composição química, defeitos internos e tratamento térmico dos materiais com a sua tenacidade. Isso levou ao ajuste em seu processo de fabricação, de forma a atingir os novos critérios de aceitação estabelecidos a partir desses estudos (TÓTH et al., 2002). Ainda em 1912, Charpy mais uma vez mostrou seu interesse no assunto, publicando um artigo na IATM (1912) apontando as condições para assegurar a compatibilidade de ensaios de impacto em barras entalhadas, e promovendo mais discussões sobre o tema. Apesar de todos os estudos, apenas em 1933 um procedimento, mesmo que provisório, foi emitido pela American Society for Testing and Materials (ASTM), segundo Tóth et al. (2002). Muitas revisões deste procedimento ocorreram até que a norma ASTM E-23 se estabeleceu como norma mundialmente utilizada para a execução do ensaio de impacto Charpy, que apesar de ter sido adotada em muitas organizações no mundo, não era um consenso de que deveria ser adotada como parâmetro para liberação de materiais, até que então foi reconhecido como uma maneira eficaz para verificar a transição dúctil-frágil de um material. Isso provavelmente só ocorreu durante a Segunda Guerra, após os episódios dos navios da classe Liberty. Segundo Tóth (2002), foi na investigação desses casos que os estudiosos chegaram à conclusão de que aquelas ocorrências de fratura frágil não tinham relação direta com composição química, ou com propriedades dos materiais obtidas por ensaios estáticos, ou ainda com microestrutura daqueles materiais. Além disso, o U.S. National Bureau of Standards, órgão responsável pelas investigações, incluiu em seu relatório a recomendação de que materiais cuja aplicação envolvesse entalhes, baixas temperaturas ou carregamentos abruptos deveriam ser especificados contemplando um valor mínimo de

tenacidade, que seria de 20J, embora neste relatório do U.S. National Bureau of Standards não se cite a qual temperatura este valor de energia absorvida deveria ser atingido (WILLIAMS, 1948 apud TÓTH, 2002). Infelizmente, nesta referência não fica claro quando tal relatório foi emitido, pois comenta apenas que isso ocorreu após a 2ª Guerra.

Na Rússia, estudos envolvendo o ensaio de impacto foram desenvolvidos no início do século passado, conforme relatam Makhutov, Morozov e Matvienko (2002). Segundo eles, em 1939 Vitman e Stepanov mostraram que havia uma relação entre a tenacidade do material e a temperatura na qual o mesmo era solicitado, assim como com o formato e tamanho do corpo de prova. Viu-se que a diminuição da espessura do corpo de prova movia a temperatura de transição para menores temperaturas, e um aumento no tamanho do corpo de prova trazia aumento na temperatura de transição. Depois disso, em 1946, Drozdovsky discutiu que a questão relativa à energia absorvida por um material pode ser descrita como a energia necessária para deformação plástica, a falha, a iniciação e a propagação da trinca. Para esses trabalhos iniciais, corpos de prova não-normatizados foram utilizados, como mostra a Figura 19.

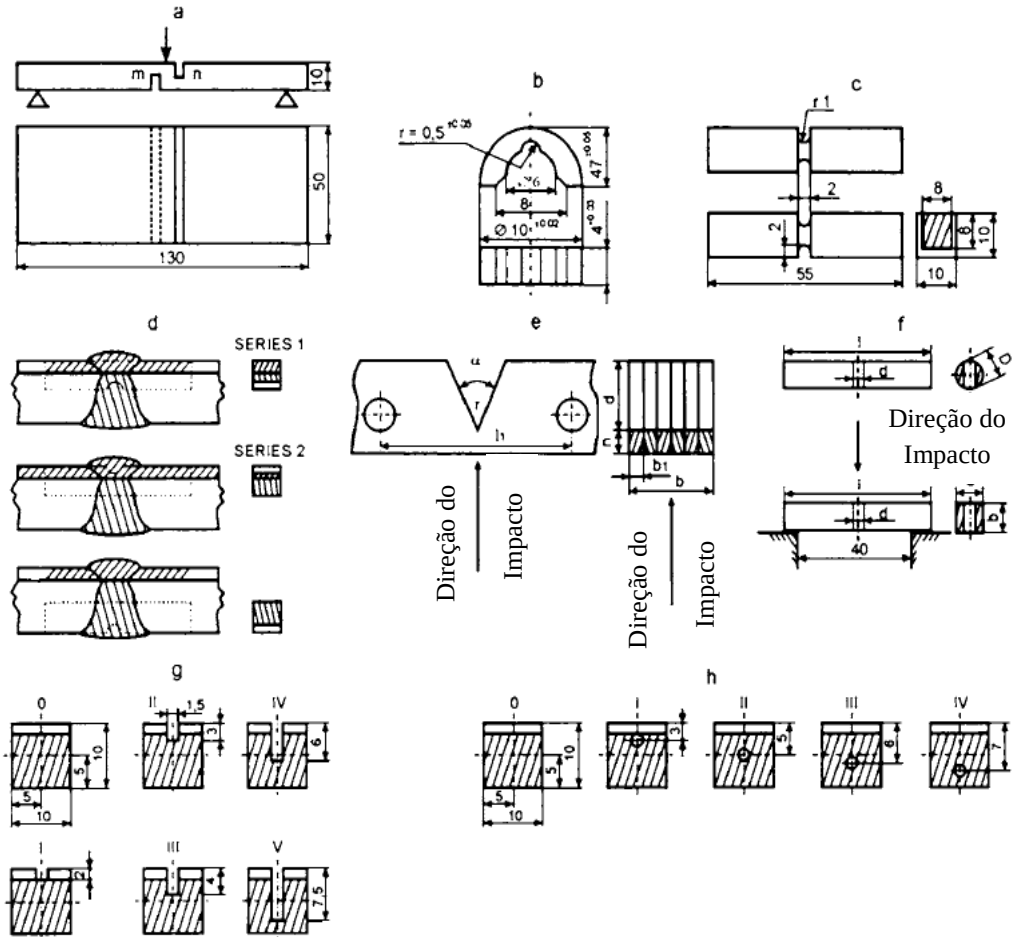


Figura 19 – Exemplos de corpos-de-prova não-normatizados utilizados na Rússia para o desenvolvimento do ensaio de impacto naquele país.

Fonte: Makhutov, Morozov e Matvienko, 2002, p. 198

Como consequência desses estudos, um procedimento de ensaio foi definido pelos estudiosos da época, que estabeleceu também os três principais formatos a serem adotados nos corpos de prova, conforme as Figuras 20, 21 e 22, e suas dimensões, conforme mostram as Tabelas 1, 2 e 3. Todas essas definições foram oficializadas na norma russa GOST 9454 (1978).

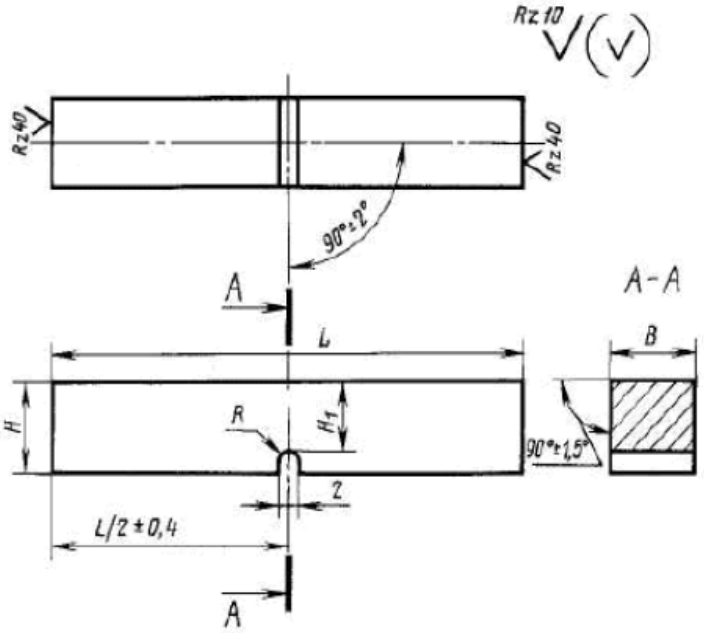


Figura 20 – Corpos de prova “Tipo U” normatizados na Rússia.

Fonte: Norma GOST 9454 (1978)

Tabela 1. Dimensões dos corpos de prova “Tipo U” normatizados na Rússia.

Tipo do Concentra-dor de Tensão	Raio (mm)	Tipo de Amos-tra	L (mm) (±0,6)	B (mm)	H (mm) (±0,1)	h1 (mm) (±0,1)	h (mm) (±0,6)	H1 (mm)
U	1 ± 0,07	1	55	10 ± 0,10	10	---	---	8 ± 0,10
		2		7,5 ± 0,10				
		3		5 ± 0,05				
		4		2 ± 0,05	8			6 ± 0,10
		5		10 ± 0,10	10			7 ± 0,10
		6		7,5 ± 0,10				
		7		5 ± 0,05				
		8		10 ± 0,10				5 ± 0,10
		9		7,5 ± 0,10				
		10		5 ± 0,05				

Fonte: Autora, Adaptado da norma GOST 9454 (1978)

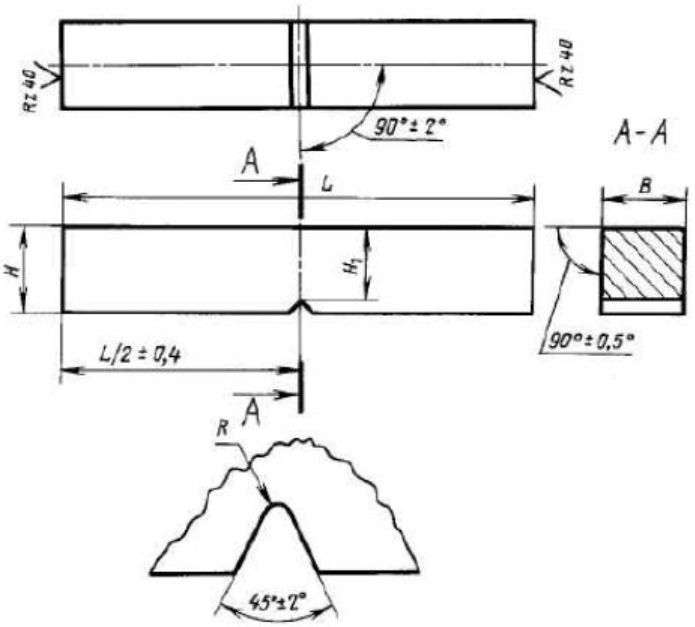


Figura 21 - Corpos de prova “Tipo V” normatizados na Rússia.

Fonte: Norma GOST 9454 (1978)

Tabela 2. Dimensões dos corpos de prova “Tipo V” normatizados na Rússia.

Tipo do Concentra-dor de Tensão	Raio	Tipo de Amos-tra	L (mm) (± 0,6)	B	H (mm) (± 0,1)	h1 (mm) (± 0,1)	h (mm) (± 0,6)	H1
V	0,25± 0,025	11	55	10 ± 0,10	10	---	---	8 ± 0,05
		12		7,5 ± 0,10				
		13		5 ± 0,05				
		14		2 ± 0,05	8			6 ± 0,05

Fonte: Autora, Adaptado da norma GOST 9454 (1978)

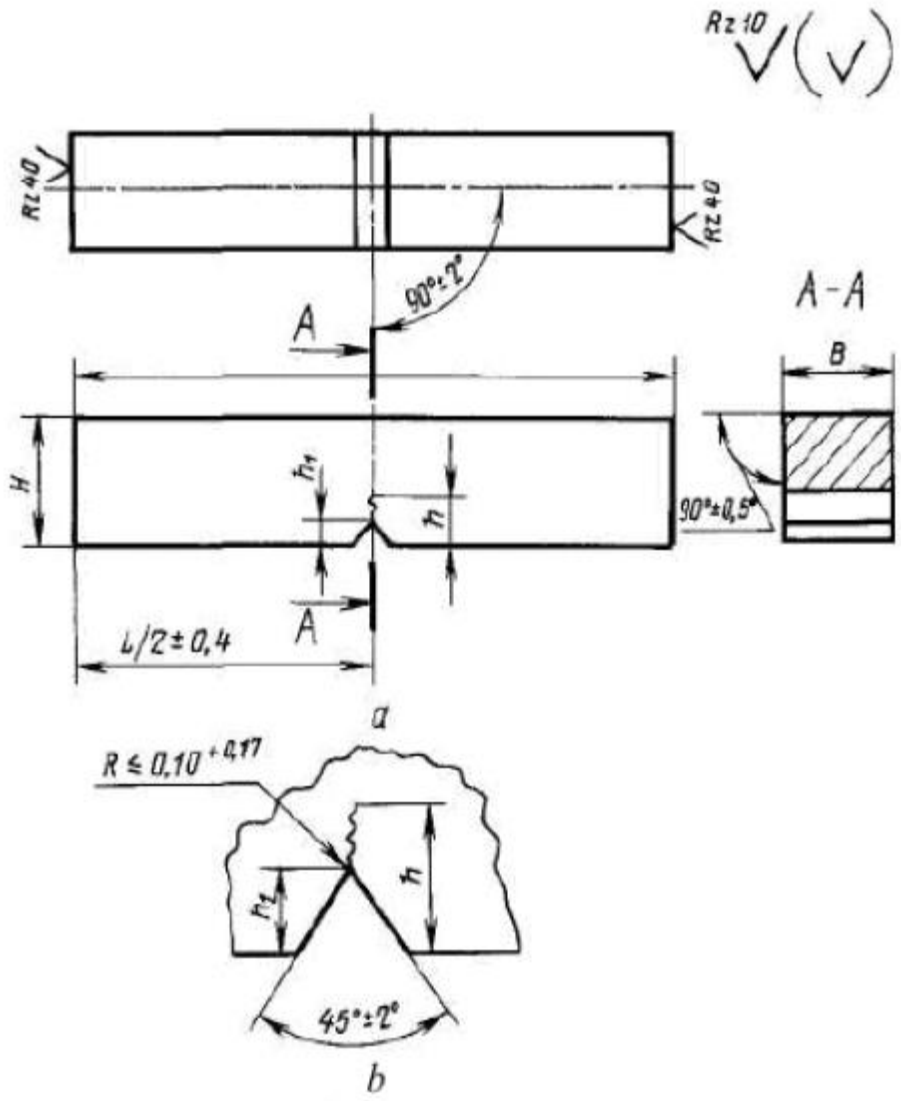


Figura 22 - Corpos de prova “Tipo T” normatizados na Rússia.

Fonte: Norma GOST 9454 (1978)

Tabela 3. Dimensões dos corpos de prova “Tipo T” normatizados na Rússia.

Tipo do Concentra-dor de Tensão	Raio	Tipo de Amos-tra	L (mm) (± 0,6)	B	H (mm) (± 0,1)	h1 (mm) (± 0,1)	h (mm) (± 0,6)	H1
T	Trinca	15	55	10 ± 0,10	11	1,5	3,0	---
		16		7,5 ± 0,10				
		17		5 ± 0,05				
		18		2 ± 0,05	9			
		19		10 ± 0,10	10	3,5	5,0	

Fonte: Autora, Adaptado da norma GOST 9454 (1978)

Makhutov, Morozov e Matvienko (2002) comentam que os estudiosos russos reconheceram a grande variedade de possíveis critérios para determinação da temperatura transição dúctil frágil de um material, e na época já entendiam como sendo de grande importância que houvesse um critério único para a definição desta característica do material. Entretanto, segundo eles, a definição deste critério poderia ocorrer levando-se em consideração o propósito para o qual se precisa definir a temperatura de transição: se para pesquisa ou análise de integridade estrutural. Se o caso for uma pesquisa, a temperatura de transição servirá para comparação entre diferentes ligas, mas se o caso for uma análise estrutural, a definição da temperatura de transição terá por objetivo estabelecer a melhor combinação entre o material utilizado e o tratamento térmico ao qual este será submetido, para ser aplicado em determinada temperatura. Os autores acreditam que para o primeiro caso, podem haver diversos critérios para a determinação da temperatura de transição, enquanto que para o segundo, o único critério que deveria ser adotado é o critério da energia de propagação da trinca, que tem sua origem nos fundamentos da Mecânica da Fratura, e que deve ser determinado com base na experiência de operação da estrutura ou por experimentos especiais que simulam as condições de serviço da estrutura. Exemplo disso é o trabalho apresentado por Tanguy et al. (2004), que utilizou como temperatura de transição do aço A-508 aquela na qual a energia absorvida pelo material é 56 J, pois este é o critério utilizado para avaliação de

materiais retirados de vasos de pressão em serviço, segundo norma francesa que normatiza este tipo de avaliação.

As relações entre as dimensões do corpo de prova e o raio do entalhe, para os 3 tipos de entalhes possíveis para o ensaio de impacto Charpy foram relatados por Pilkey (1997), e estão mostradas na Figura 23. Conforme já comentado, variações dimensionais no entalhe ou no corpo de prova alteram seu estado de tensões (k_{tn}), e o entalhe tipo V é o que apresenta o maior fator concentrador de tensões, e portanto é o tipo de entalhe que apresenta condição mais crítica de solicitação do material.

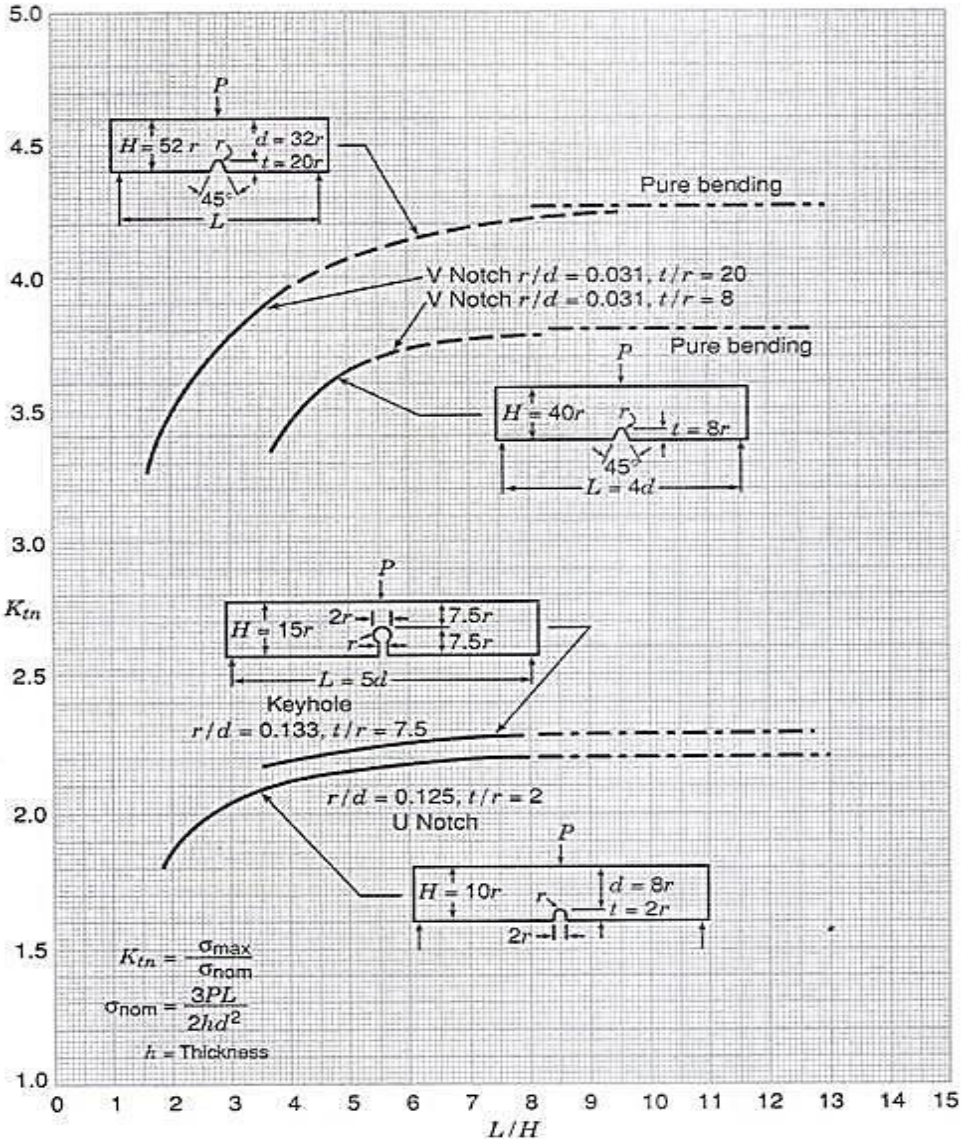


Figura 23 – Gráficos comparativos do fator concentrador de tensões em função das características dimensionais do corpo de prova e do entalhe.

Fonte: Pilkey, 1997, p. 112[1]

[1] Na Figura 23, optou-se por manter a formatação original, em inglês.

2.6 Resultados obtidos pelo ensaio de impacto

Garcia et al. (2008) relacionam as informações que podem ser obtidas de um ensaio de impacto:

a) Energia absorvida: obtida pela leitura da máquina;
b) Contração ou expansão lateral: obtida pela medida das dimensões finais do corpo de prova na região da fratura, comparando-se com as medidas originais do mesmo;
c) Aparência da fratura: determinação da porcentagem de fratura frágil ocorrida na fratura do corpo de prova, obtida pela avaliação da face de fratura do corpo de prova.

A Figura 24 apresenta resultados do ensaio de impacto sob as três diferentes considerações, tendo sido ensaiados corpos de prova com os três tipos de entalhe possíveis para o ensaio de impacto Charpy, sendo possível, portanto, observar a influência do tipo de corpo de prova nos resultados.

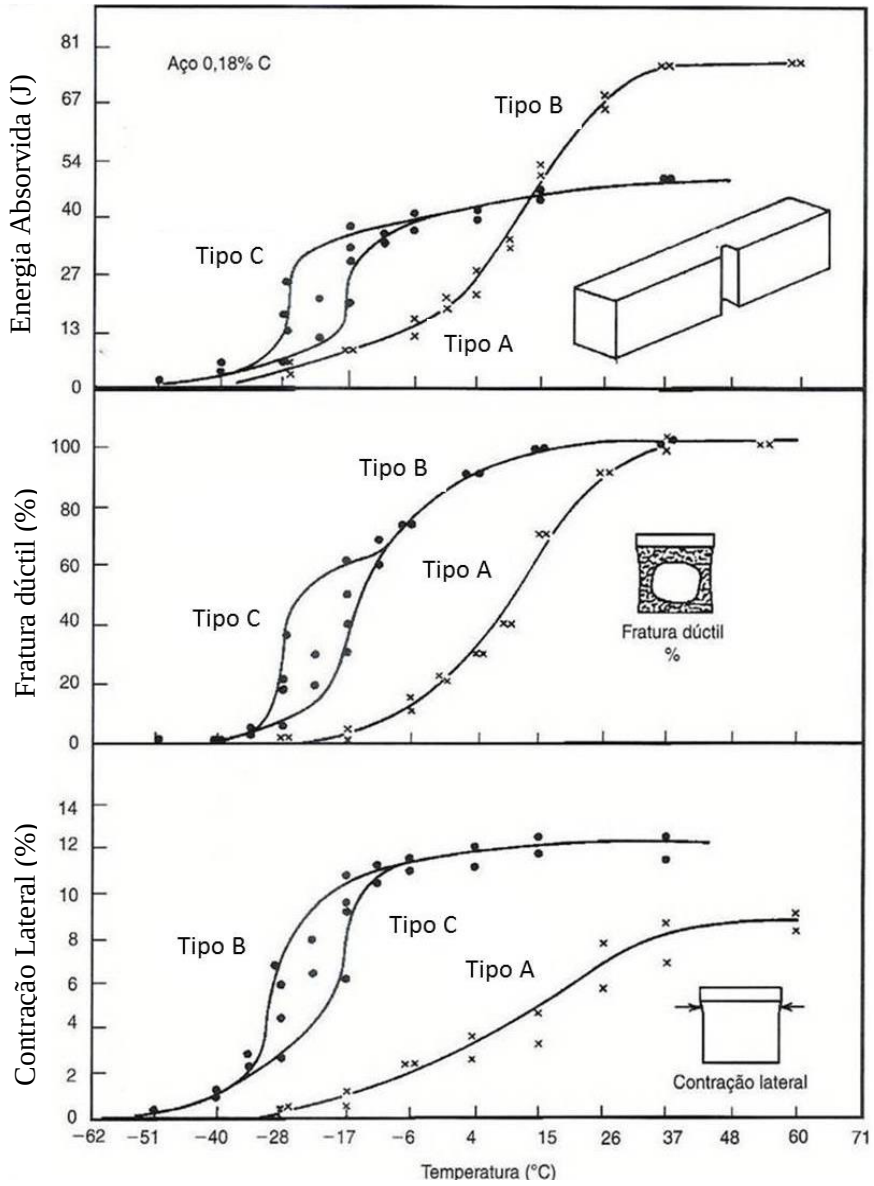


Figura 24 – Formas de representação dos resultados do ensaio de impacto Charpy, em função do tipo de entalhe.
Fonte: Garcia et al., 2008, p. 163

Para a determinação da TTDF, objetivo deste trabalho, a aparência da fratura é um dos fatores considerados, pois mostra como ocorre o mecanismo de falha do material a diversas temperaturas, ou seja, quanto de fratura dúctil (ou fibrosa) e quanto de fratura frágil (ou granular) ocorreu até sua ruptura, em função da temperatura. Na Figura 25 mostra-se uma série de faces de fratura obtidas através de ensaios de impacto realizados por Silva (2009, p.69), mostrando a evolução da fratura dúctil para a fratura frágil, em função da temperatura, em corpos de prova do aço API 5L X80. Vê-se que há regiões que apresentam fraturas dúcteis, cuja superfície aparece de maneira fibrosa ou opaca, e regiões que apresentam fraturas frágeis, predominantemente por clivagem, estas sendo de aparência brilhosa. A

transição de uma característica para a outra se dá com a variação da temperatura. Pode-se ver também a evolução quanto à expansão lateral dos corpos de prova, maior nas temperaturas superiores, onde a fratura dúctil é favorecida.

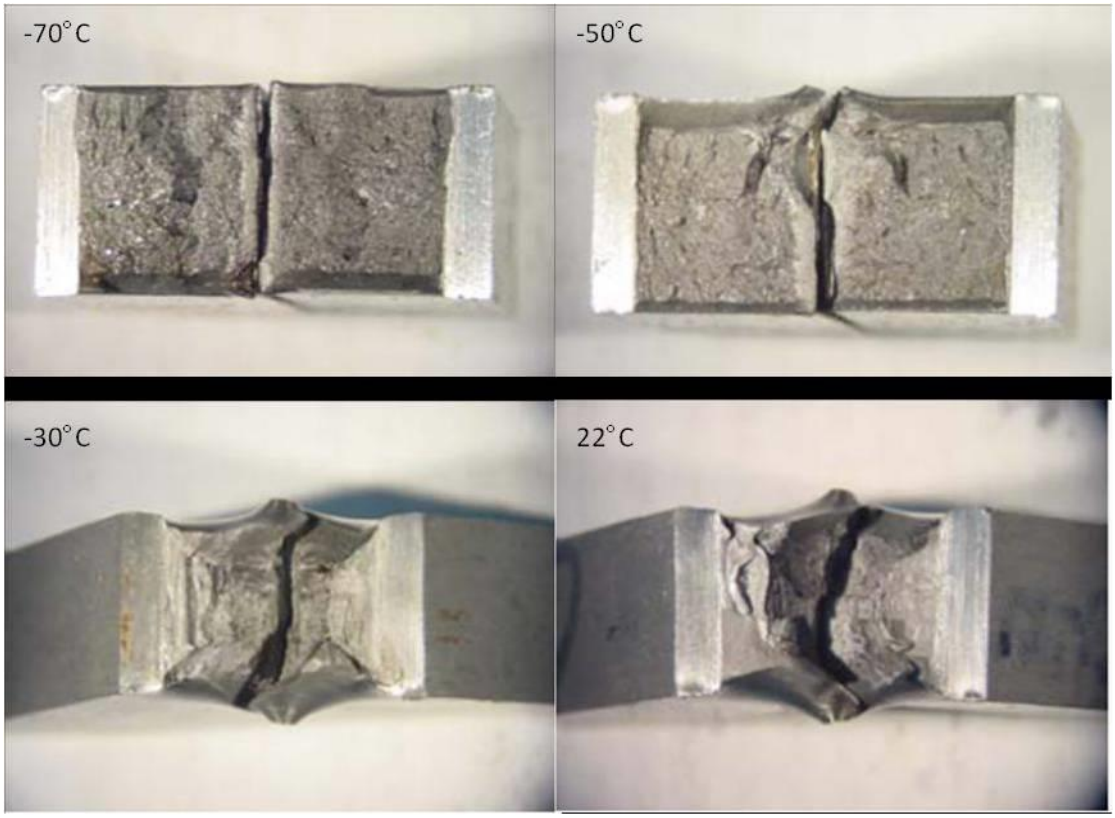


Figura 25 – Faces de fratura obtidos em ensaios de impacto Charpy com corpos de prova do aço API 5L X80 a diversas temperaturas.

Fonte: Silva, 2009, p. 69

2.7 Abordagens para determinação da TTDF

Sabe-se que a ocorrência de transição dúctil-frágil se dá em uma faixa de temperaturas. Por isso, a determinação da TTDF pode ocorrer de diversas formas, com diferentes abordagens, utilizando as diferentes informações obtidas no ensaio de impacto. Garcia et al. (2008) citam como maneira mais comum para determinação da TTDF aquela que estabelece um ponto no qual a energia de impacto atinge um determinado valor. Pode-se também utilizar um ponto correspondente a um percentual de fratura dúctil. Uma decisão extremamente conservadora admitiria que a TTDF ocorreria a uma temperatura onde não ocorre fratura frágil, ou seja, na qual haveria 100% de fratura dúctil.

Davim e Magalhães (2004, pp. 131 e 132) comentam as diversas maneiras possíveis para determinar a TTDF, citando como exemplos:

a) Temperatura correspondente ao ponto da curva de energia absorvida por temperatura onde se inicia a queda no valor da energia absorvida, também designada por temperatura de transição plástica de fratura;
b) temperatura correspondente ao ponto da curva anteriormente citada onde o valor de energia absorvida é igual à média dos dois patamares;
c) temperatura abaixo da qual o material apresenta energia absorvida inferior a um valor pré-estipulado;
d) temperatura acima da qual a fratura é 100% fibrosa;
e) temperatura que produz uma fratura 50% fibrosa e 50% brilhante;
f) temperatura abaixo da qual a fratura é 100% brilhante (temperatura de ductilidade nula).

Já Callister (2005, p. 312) diz que não há uma única maneira para a definição da TTDF, e que normalmente assume-se que a temperatura de transição é aquela na qual o material absorve 20J de energia, como proposto pelo U.S. National Bureau of Standards e já mencionado por Tóth et al., 2002.

Hertzberg (1996, p.378), por sua vez, cita três metodologias para determinação da TTDF: (a) a temperatura na qual o material absorve 20 J, assim como Callister (2005, p. 312) e o U.S. National Bureau of Standards recomendou na época da investigação das ocorrências de fratura nos navios da classe Liberty (TÓTH et al., 2002), (b) critério da contração lateral, na qual se verifica a temperatura na qual o corpo de prova atinge contração lateral de 0,38mm e (c) temperatura na qual se obtém 50% de fratura fribrosa, ou fratura dúctil. Entretanto, Hertzberg (1996) comenta que o método de definição da temperatura de transição deve ser definido de acordo com o tipo de material que está sendo avaliado, e sua aplicação. Como exemplo, ele cita que no caso do material dos navios da classe Liberty na Segunda Guerra, não existe histórico de falha com absorção de energia maior que 20 J, dando a entender que este foi um dos primeiros critérios adotados por ter sido este um dos primeiros episódios de falha que levou ao estudo sobre a existência e relevância de se conhecer a temperatura de transição dos materiais. Entretanto, ele comenta que a dificuldade para a definição da TTDF é ainda maior se mais de um critério for considerado. Para ilustrar isso, Hertzberg (1996) mostra um comparativo entre os valores obtidos por três avaliações para três diferentes aços,

conforme Tabela 4, mostrando que há proximidade entre os valores obtidos pelos critérios de absorção de 20J de energia e de 0,38mm de contração lateral, mas que os dois valores diferem dos valores obtidos para 50% de fratura dúctil.

Tabela 4. Comparativo da TTDF obtida para diferentes materiais, por diferentes critérios.

Material	Temperatura de Transição, em ºC		
	20 J	0,38 mm	50% fratura dúctil
Aço Cr-Mn, Laminado a Quente	27	17	46
Aço Baixa-Liga, Laminado a Quente	-24	-22	12
Aço, Temperado e Revenido	-71	-67	-54

Fonte: Autora, Adaptado de Hertzberg, 1996.

Relembrando os comentários do início desta seção, muitas são as abordagens possíveis para determinação da TTDF que podem ser adotadas a partir das informações obtidas pelo ensaio de impacto Charpy. Por isso, a partir deste ponto cada forma de apresentação dos dados será apresentada e discutida, pois a partir delas as várias metodologias de determinação da TTDF podem ser implementadas, de forma a possibilitar sua comparação, objetivo desta dissertação.

2.7.1 Energia absorvida em função da temperatura.

A partir do gráfico de energia absorvida em função da temperatura, é possível verificar a região de transição do comportamento de fratura do material de dúctil para frágil. O valor de energia absorvida é obtido pela leitura direta do valor na escala da máquina de ensaio de impacto. Sendo plotados esses valores em função da temperatura utilizada no ensaio, é possível verificar a mudança de comportamento do material de acordo com a mudança na temperatura de ensaio.

2.7.2 Comparação das superfícies de fratura com faces de fratura mostradas como referência na norma ASTM E23 (2012).

Avaliam-se as faces de fratura obtidas no ensaio de um determinado corpo de prova, numa determinada temperatura, comparativamente com a norma do ensaio de impacto. Na norma ASTM E23 (2012), há duas figuras que podem ser utilizadas como referência visual para esta avaliação, apresentadas nas Figuras 26 e 27.

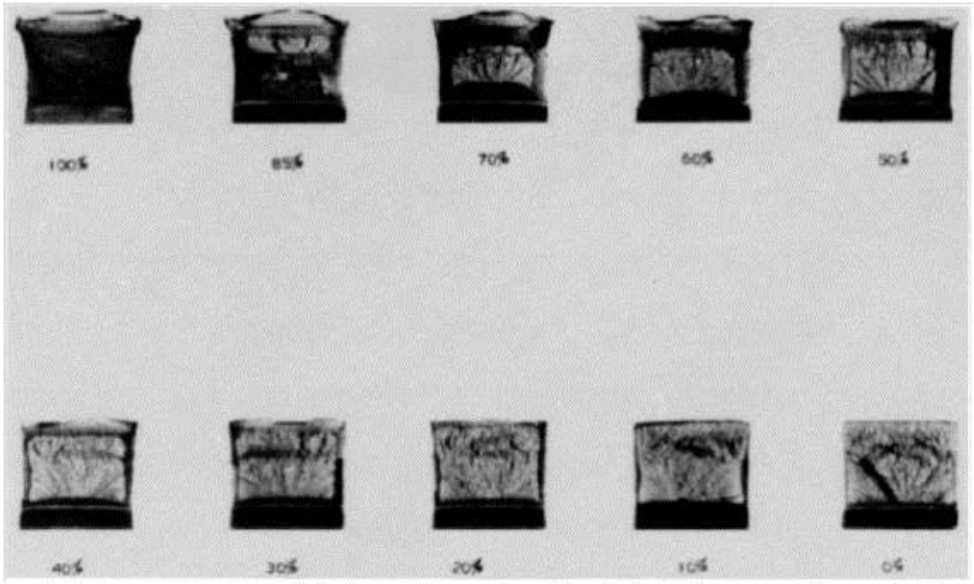


Figura 26 - Fotografias de referência para avaliação das faces de fratura de corpos de prova ensaiados por impacto.
Fonte: Norma ASTM E23 (2012)

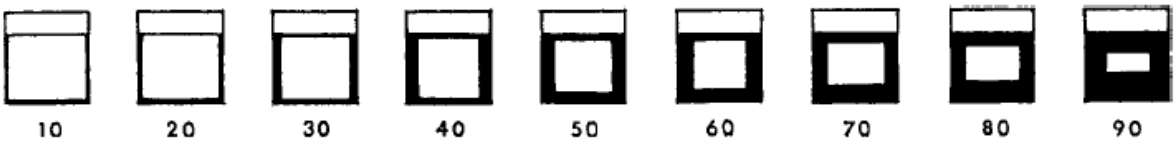


Figura 27 - Desenhos esquemáticos de referência para avaliação das faces de fratura do ensaio de impacto Charpy.
Fonte: Norma ASTM E23 (2012)

Seja qual das referências for a escolhida como referência para avaliação das faces de fratura, trata-se de um método pouco preciso, particularmente devido à pouca qualidade das fotos presentes na norma. Além disso, trata-se de uma análise puramente visual e comparativa, dependendo muito do julgamento da pessoa encarregada em realizar a análise.

Com a observação e determinação da condição da face de fratura do corpo de prova ensaiado ao impacto, é possível traçar um gráfico da porcentagem de fratura dúctil ou frágil em função da temperatura. Neste trabalho, esta avaliação de área de fratura dúctil será chamada de "qualitativa", em contraponto à próxima avaliação.

2.7.3 Avaliação da área de fratura por clivagem.

Avaliam-se as faces de fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto Charpy em lupa estereoscópica e verifica-se a porcentagem de fratura por clivagem, ou quanto de fratura dúctil e quanto de fratura frágil ocorreu para ruptura do mesmo, a partir da determinação das dimensões da região de fratura plana, utilizando o esquema da norma ASTM E23 (2012) como referência, mostrado na Figura 28.

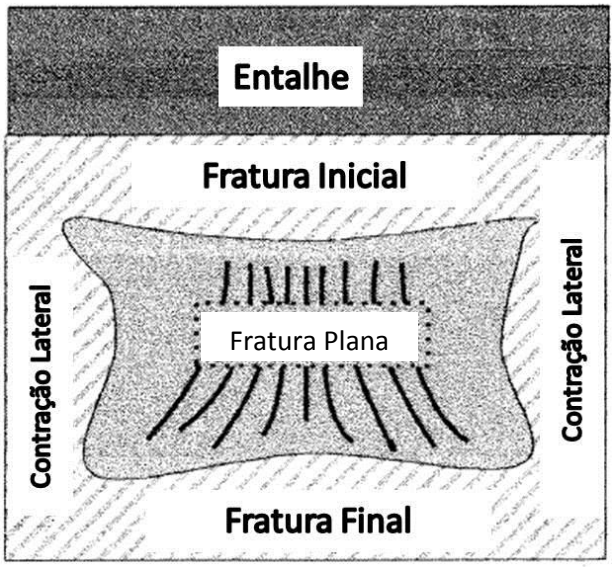


Figura 28 – Desenho esquemático de referência apresentado na norma ASTM E23 para avaliação da face de fratura do corpo de prova Charpy.

Fonte: Adaptado da norma ASTM E23 (2012)

A partir da medição da região de "fratura plana", utiliza-se a tabela também mostrada na norma para determinar a porcentagem de fratura dúctil. Tal tabela está transcrita nas Tabelas 5 e 6. Os dados obtidos na tabela são apresentados em um gráfico em função da temperatura. Como há uma medição da área de fratura plana, ao invés da comparação da fratura obtida com as Figuras 26 ou 27, esta avaliação de área de fratura dúctil ou frágil será chamada de "quantitativa", em contraponto à análise "qualitativa" do item anterior.

Tabela 5 – Valores de referência para determinação da porcentagem de fratura dúctil de um corpo de prova de ensaio de impacto Charpy a partir da medição da área de fratura por clivagem.

	Dimensão A (mm)									
Dimensão B (mm)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
1,0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93
1,5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90
2,0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86
2,5	97	95	94	91	91	89	88	86	84	83
3,0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79
3,5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76
4,0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72
4,5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69
5,0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66
5,5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62
6,0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59
6,5	92	88	84	80	76	72	69	63	59	55
7,0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52
7,5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48
8,0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45

Fonte: Autora, Adaptado da norma ASTM E23 (2012)

Tabela 6 – Valores de referência para determinação da porcentagem de fratura dúctil de um corpo de prova de ensaio de impacto Charpy a partir da medição da área de fratura por clivagem (continuação).

	Dimensão A (mm)								
Dimensão B (mm)	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
1,0	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1,5	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2,0	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2,5	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3,0	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3,5	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4,0	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4,5	66	62	61	58	55	52	49	46	44
5,0	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5,5	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6,0	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6,5	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7,0	47	43	39	34	30	26	25	17	12
7,5	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8,0	40	35	30	25	20	15	10	5	0

Fonte: Autora, Adaptado da norma ASTM E23 (2012)

As dimensões “A” e “B” mencionadas na Tabela 5 estão referenciadas na Figura 29.

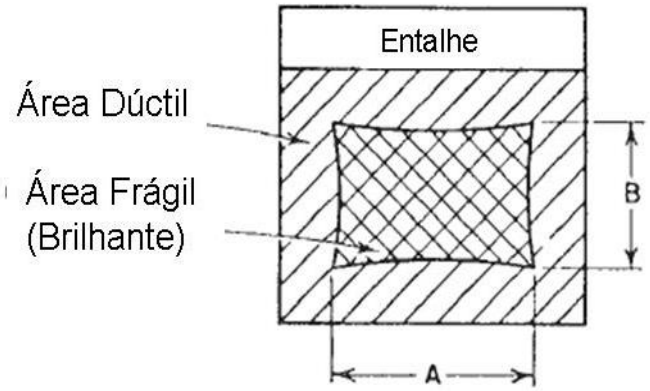


Figura 29 – Indicação das dimensões para verificação da porcentagem de fratura dúctil na face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto.

Fonte: Adaptado da norma ASTM E23 (2012)

2.7.4 Medição da expansão lateral do corpo de prova após ensaio de impacto.

A Figura 30 ilustra a face de fratura das duas metades de um corpo de prova ensaiado ao impacto pelo método Charpy. Nesta representação, as cotas “W” tem a dimensão adotada para o corpo de prova, pois é a região do entalhe, onde não ocorre representativa deformação do material durante o ensaio. Já as cotas A1, A2, A3 e A4 são as dimensões que retratam a expansão lateral do corpo de prova. Segundo a norma ASTM E23 (2012), o valor de expansão lateral do corpo de prova é o resultado da soma entre os maiores valores entre A1 e A3 e A2 e A4. Estes valores são traçados num gráfico em função da temperatura. Cabe ressaltar que a medida de expansão lateral é equivalente à medida de contração lateral adotada por Hetzberg (1996) e Garcia et al. (2008), já que é a medição de quanto o material deformou plasticamente, considerando que numa fratura 100% frágil por clivagem há ausência de deformação plástica macroscópica. Um exemplo real de medição da expansão lateral de um corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy é mostrado na Figura 31.

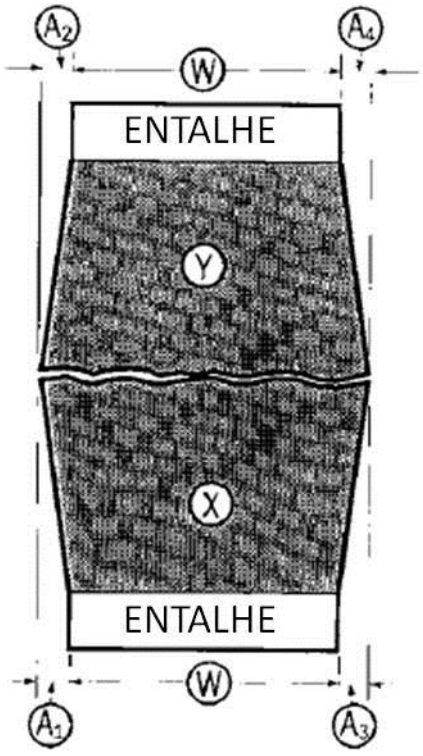


Figura 30 – Croqui das metades de um corpo de prova Charpy após ensaio, indicando as regiões de medição da expansão lateral do corpo de prova (cotas A1, A2, A3 e A4) e sua dimensão original (cotas W).
Fonte: Adaptado da norma ASTM E23 (2012)

Figura 31 – Metades de um corpo de prova Charpy após ensaio, indicando as regiões de medição da expansão lateral do corpo de prova (cotas A1, A2, A3 e A4) e sua dimensão original (cotas W).
Fonte: Autora

2.8 Tratamento dos dados pelo método da Tangente Hiperbólica.

Para todos os critérios de avaliação anteriormente citados, a curva obtida deve ser ajustada, por exemplo, conforme o método descrito por Ericksonkink e Shaikh (2008). Por este método, considerando-se os dados de energia absorvida em função da temperatura de ensaio, o ajuste feito por meio de formulação baseada em Tangente Hiperbólica fica na forma

$$Y = A + B * tanh\left\{\frac{T-D}{C}\right\}, \qquad (6)$$

sendo:

A = Média das energias entre patamares superior e inferior

B = Amplitude entre energias dos patamares superior e inferior

C = Metade da faixa da temperatura de transição

D = Temperatura da média dos patamares inferior e superior

T = Temperatura

Primeiramente, se obtém os dados experimentais, executando o ensaio de impacto no material desejado, conforme exemplo da Figura 32.

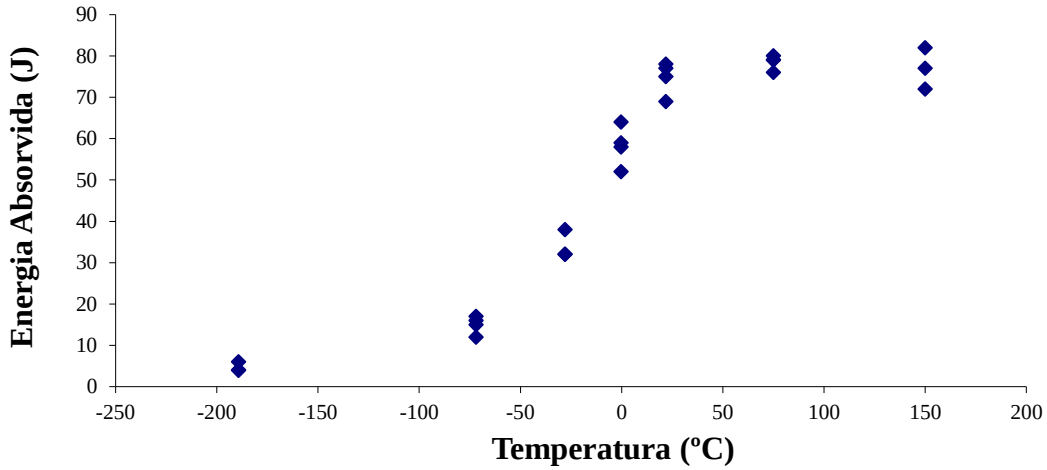


Figura 32 – Dados experimentais de energia absorvida em função da temperatura.

Fonte: Autora

Sendo EPI o valor de energia no patamar inferior e EPS o valor de energia no patamar superior, os valores de A e B podem então ser definidos, a partir dos dados experimentais e as definições acima citadas. A Figura 33 ilustra a determinação desses valores.

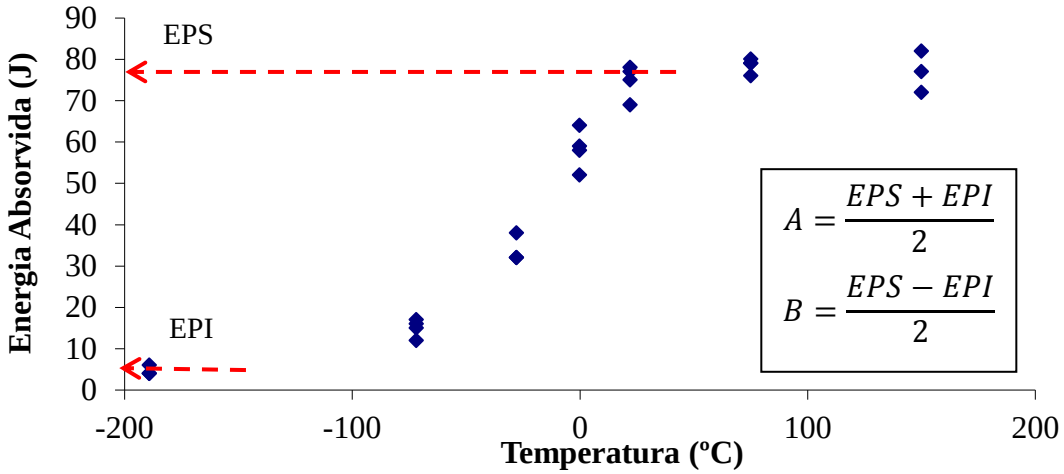


Figura 33 – Ilustração da determinação dos parâmetros A e B a partir dos dados experimentais de energia absorvida em função da temperatura, para ajuste da curva pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

Em seguida, uma reta deve ser traçada com os dados da região de transição, de maneira que grande aderência seja obtida. Tem-se, então uma curva semelhante à Figura 34.

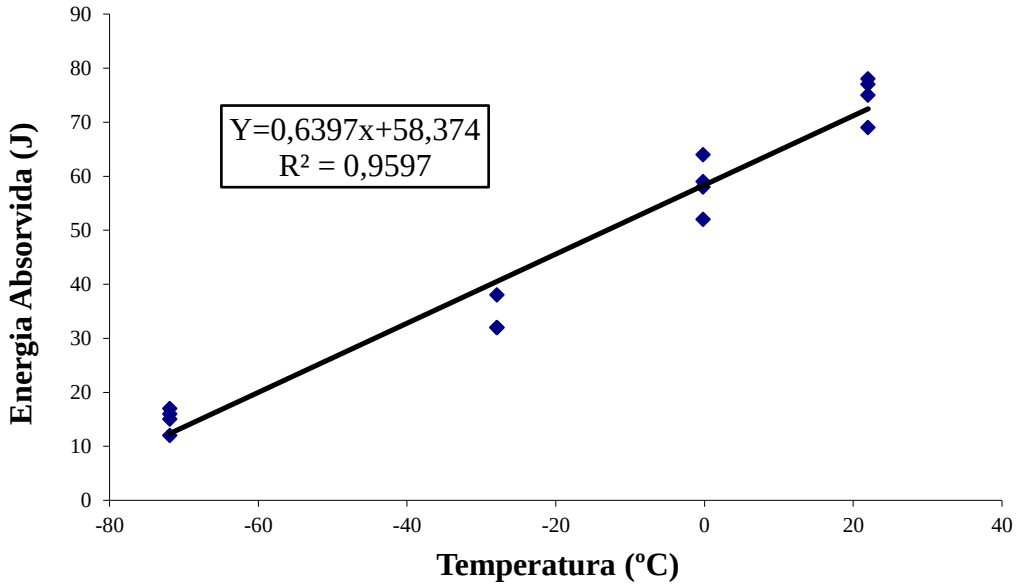


Figura 34 – Exemplo de gráfico de energia absorvida em função da temperatura da região de transição, para ajuste pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

Com a equação obtida, determinam-se as temperaturas que representam as intersecções entre a região de transição e os patamares superior e inferior, igualando *y* às energias dos patamares superior e inferior.

Para definição de C e D, utiliza-se um algoritmo GRG 2 (Gradiente Reduzido Generalizado) para otimização de seus valores, de maneira a minimizar os erros quadrados, não-linearmente.

Com todos os valores definidos, pode-se gerar uma curva utilizando a Eq. 6, com ajuste mais refinado, de maneira que a TTDF pode ser aquela na qual se tem a energia média entre os patamares superior e inferior ajustados pela nova curva (EPS_{aj} e EPI_{aj}, respectivamente). A curva final obtida por este ajuste, e os valores de EPS_{aj} e EPI_{aj}, são apresentados na Figura 35.

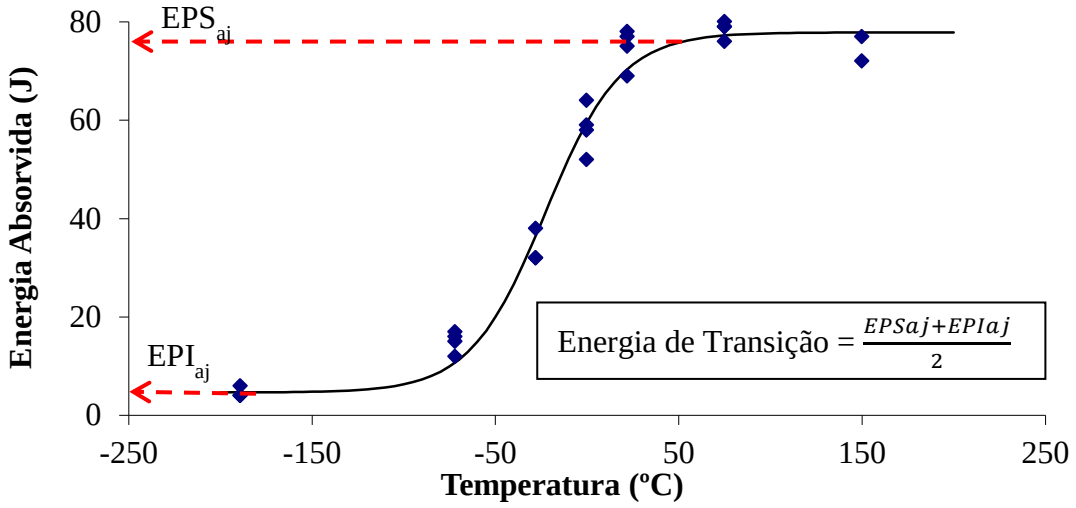


Figura 35 – Dados de energia absorvida em função da temperatura ajustados pelo método da Tangente Hiperbólica, e indicação da determinação da TTDF a partir desta curva.

Fonte: Autora

Cabe comentar que a metodologia de ajuste pelo método da Tangente Hiperbólica é exemplificada utilizando dados de energia absorvida em função da temperatura, mas poderiam ser utilizados os valores de porcentagem de fratura dúctil ou expansão lateral em função da temperatura.

2.9 Definições da TTDF

Levando em conta todas as considerações feitas até este ponto a respeito das informações obtidas no ensaio de impacto e o tratamento destes dados pelo método da Tangente Hiperbólica, cabe neste momento definir as diversas abordagens que serão utilizadas para definir a temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) do aço objeto de estudo neste trabalho. Serão definidos a seguir seis critérios de TTDF que serão utilizados no presente estudo:

a) TTDF-mEn: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil como a temperatura onde ocorre a média das energias absorvidas nos patamares superior e inferior;

b) TTDF-mEL: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil como a temperatura onde ocorre a média das expansões laterais dos corpos de prova ensaiados ao impacto;

c) TTDF-50/50: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil como a temperatura onde ocorre 50% de fratura dúctil e 50% de fratura frágil;

d) TTDF-TDN: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil como a temperatura onde ocorre transição de ductilidade nula, ou seja, fratura 100% frágil;

e) TTDF-TFN: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil como a temperatura onde ocorre transição de fragilidade nula, ou seja, fratura 100% dúctil;

f) TTDF-20J: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil como a temperatura onde ocorre absorção de 20J de energia.

Importante também é lembrar que cada um dos critérios para determinação da TTDF acima descritos poderá ser adotado em diferentes situações, dependendo da maneira como os dados obtidos no ensaio de impacto Charpy foram coletados. A TTDF-50/50 não poderá ser determinada com um gráfico de energia absorvida em função da temperatura, por exemplo, assim como a TTDF-20J não poderá ser obtida caso a opção seja utilizar um gráfico de expansão lateral em função da temperatura. Por isso, a seguir são apresentados nas Figuras 36,

37 e 38 os gráficos das diferentes informações obtidas a partir do ensaio de impacto Charpy em função da temperatura, e como a TTDF poderá ser definida em cada situação, de acordo com as definições acima descritas.

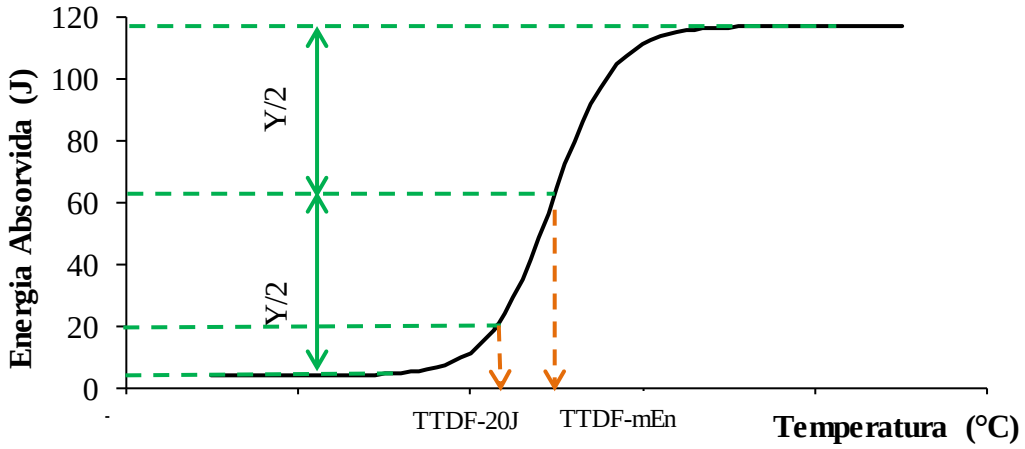


Figura 36 – Gráfico de energia absorvida em função da temperatura e diferentes TTDFs que podem ser obtidas a partir dele.

Fonte: Autora

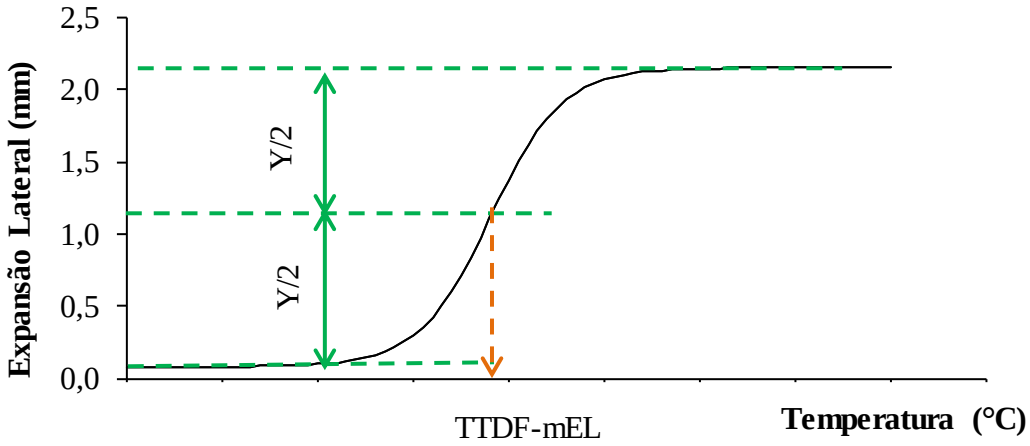


Figura 37 – Gráfico de expansão lateral em função da temperatura e TTDF que pode ser obtida a partir dele.

Fonte: Autora

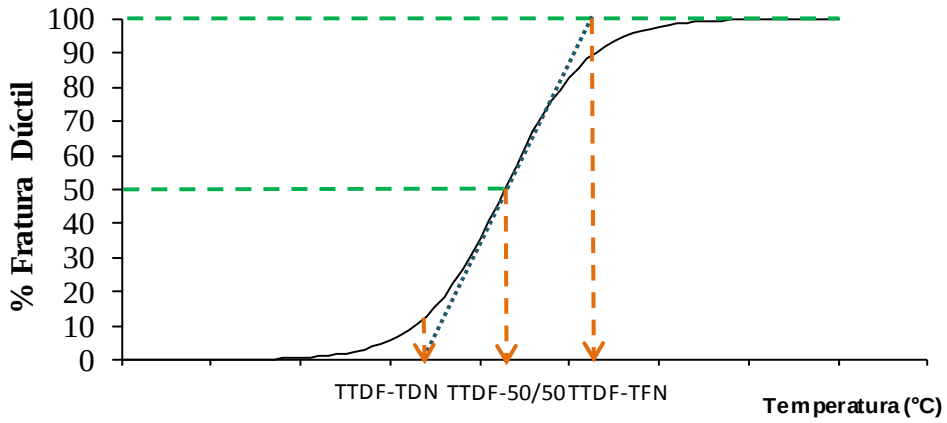


Figura 38 – Gráfico de porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura e diferentes TTDFs que podem ser obtidas a partir dele.

Fonte: Autora

Os valores de TTDF-50/50, TTDF-mEL e TTDF-mEn poderão ser comparados entre si, uma vez que são definidos com base em conceitos similares: o valor médio entre o comportamento dúctil e frágil. Além disso, será possível também estimar os valores de TTDF-TDN e TTDF-TFN a partir dos gráficos de energia absorvida e expansão lateral em função da temperatura, e avaliar quão significativos são esses valores. As figuras 39 e 40 mostram como se determinam esses valores nos gráficos.

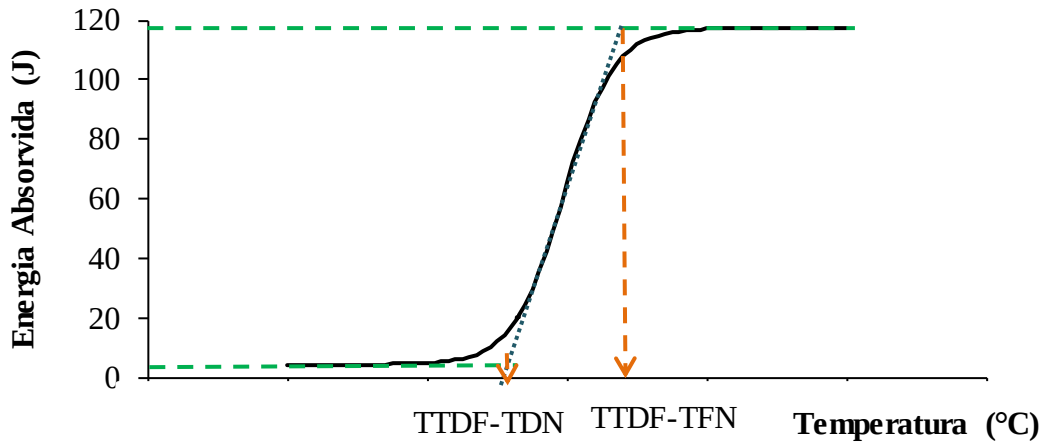


Figura 39 – Gráfico de energia absorvida em função da temperatura e a determinação indireta das TTDF-TDN e TTDF-TFN.

Fonte: Autora

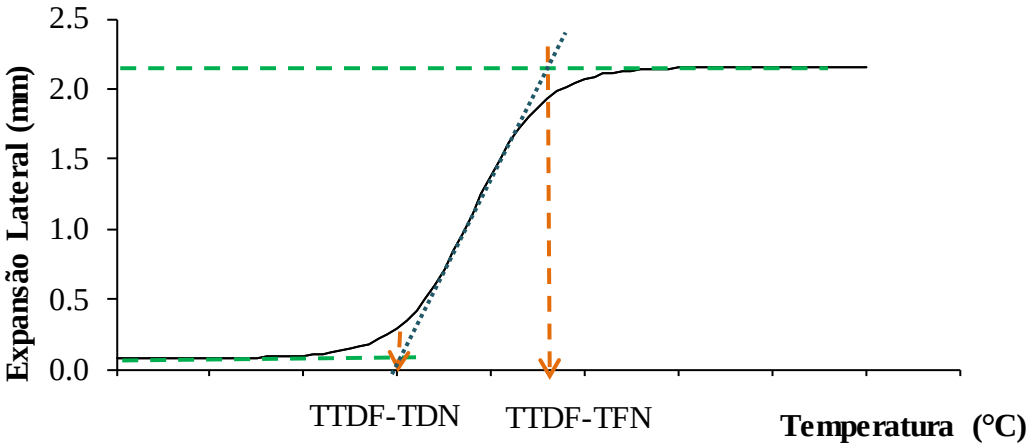


Figura 40 – Gráfico de expansão lateral em função da temperatura e a determinação indireta das TTDF-TDN e TTDF-TFN.

Fonte: Autora

2.10 Revisão de dados disponíveis na literatura e avaliação da TTDF.

Esta seção tem por objetivo avaliar dados presentes na literatura, obtidos em ensaios de impacto realizados em diferentes condições à luz das metodologias de determinação da TTDF anteriormente apresentadas.

Tanguy et al. (2007, p.32) ensaiaram ao impacto o aço A508 a diversas velocidades, resultando em diversas taxas de deformação, exemplificando a diferença de comportamento que este material apresenta, sendo utilizado o mesmo tipo de corpo de prova nos diferentes ensaios. Fazendo uma avaliação das curvas, pode-se observar que o valor de máxima energia absorvida difere entre eles, e o maior valor ocorre quando a maior velocidade, que gera a maior taxa de deformação, é utilizada. No que diz respeito à TTDF, os autores a definiram como a temperatura na qual o material absorve 56J, que é uma forma de definição utilizada para avaliação de aços estruturais utilizados em vasos de pressão na França. Na Figura 41 esta temperatura está indicada como TK_7, e varia de -65ºC a -88°C. Entretanto, vê-se que neste caso não há relação entre a TTDF e a taxa de deformação pois os valores de TTDF não variam proporcionalmente à variação da taxa de deformação do material.

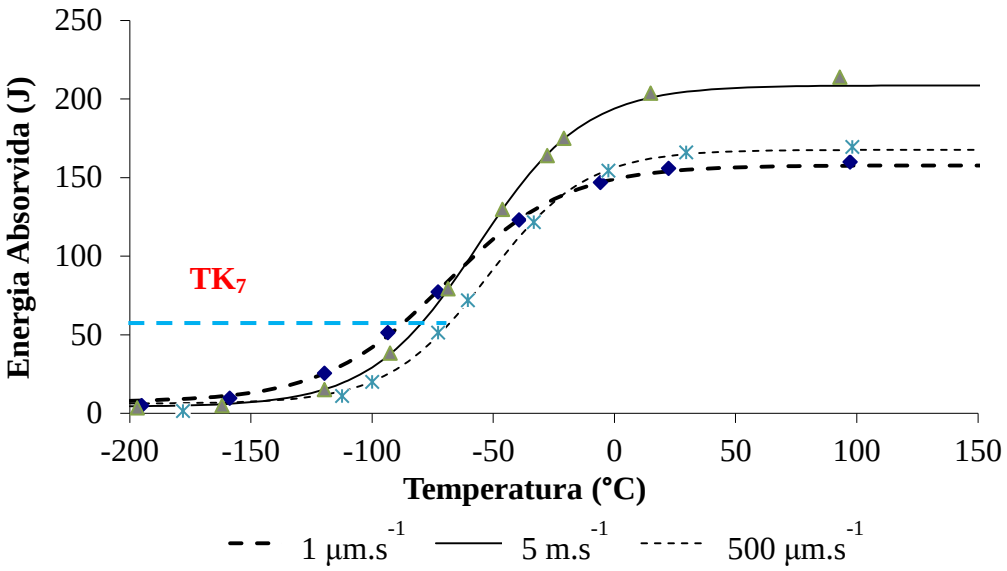


Figura 41 – Curvas de energia absorvida em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica confeccionado com os dados obtidos por Tanguy et al. (2007, p. 32).

Fonte: Autora

Para caracterizar a transição dúctil-frágil do material descrito na Figura 41, é primordial determinar a TTDF. Neste caso, é possível determinar a TTDF diretamente por 2 das 6 definições mostradas anteriormente, TTDF-mEn e TTDF-20J, além de ser também possível compará-las com o valor de TK_7 que os autores utilizam como TTDF. Além disso, pode-se indiretamente determinar as TTDF-TDN e TTDF-TFN como sendo as temperaturas nas quais ocorre a intersecção da reta que representa a zona de transição com os patamares de energia inferior e superior, respectivamente. Tais resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores da TTDF após ajuste pelo método da Tangente Hiperbólica dos dados do material A-508 estudado por Tanguy et al. (2007), ensaiado a 3 diferentes taxas de deformação.

Velocidade de Impacto	TK_7 (°C)	TTDF-mEn (°C)	TTDF-TDN (°C)	TTDF-TFN (°C)	TTDF-20J (°C)
$5m.s^{-1}$	-78,4	-56,5	-103,0	-8,0	-110,0
$500\mu m.s^{-1}$	-65,7	-52,4	-94,0	-10,0	-100,0
$1\ \mu m.s^{-1}$	-86,3	-69,8	-120,0	-18,0	-130,0

Fonte: Autora

Com os valores obtidos, verifica-se com mais detalhes o que acontece com a TTDF quando se modifica a velocidade de impacto do pêndulo, sob as diversas abordagens. Pode-se verificar que a TTDF-20J é menor que a TTDF-TDN. Entretanto, é necessária uma reflexão cuidadosa sobre este dado, uma vez que se o patamar inferior de absorção de energia encontra-se perto de zero e esta é a condição onde com certeza a ductilidade do material é nula, vê-se que esta afirmação não faz sentido. Levando-se em conta que a determinação da TTDF-TDN é indireta, como anteriormente comentado, pode-se dizer que esta aproximação está longe de representar o comportamento real do material.

Druce et al. (1987) também estudaram a influência do entalhe na tenacidade do material. Esses autores ensaiaram um aço inoxidável dúplex SA351 CF3 ao impacto Charpy utilizando 6 tipos de entalhes diferentes. As Figuras 42 a 47 mostram os dados obtidos pelos autores tratados pelo Método da Tangente Hiperbólica, tornando possível verificar a diferença de comportamento na tenacidade do material, havendo diferenças na temperatura do patamar superior e também na zona de transição, havendo transições mais bruscas e transições mais suaves do comportamento dúctil para o comportamento predominantemente frágil do material.

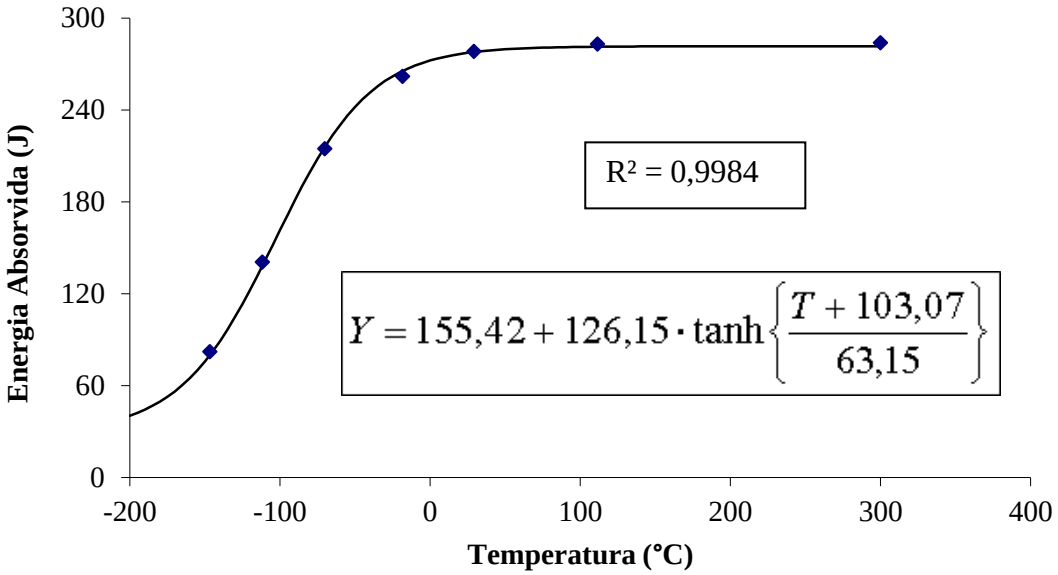


Figura 42 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 8, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987).

Fonte: Autora

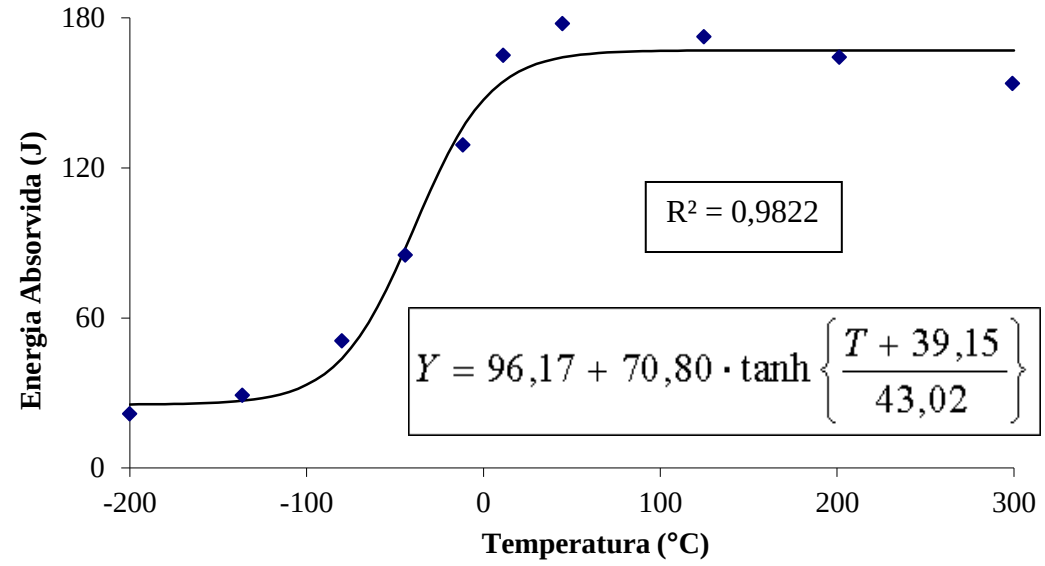


Figura 43 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 8s, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987).

Fonte: Autora

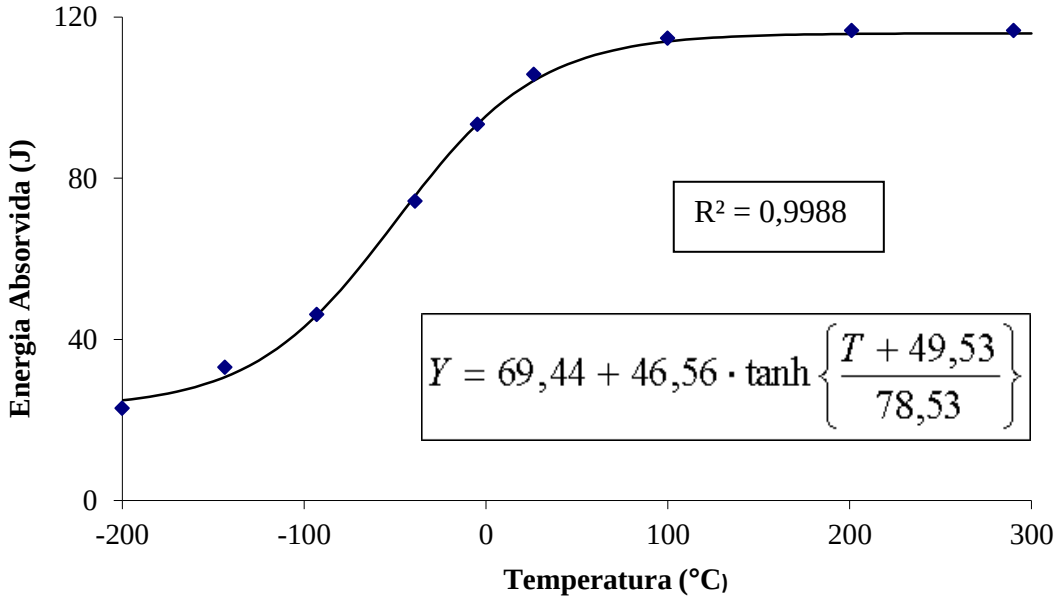


Figura 44 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 5, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987).

Fonte: Autora

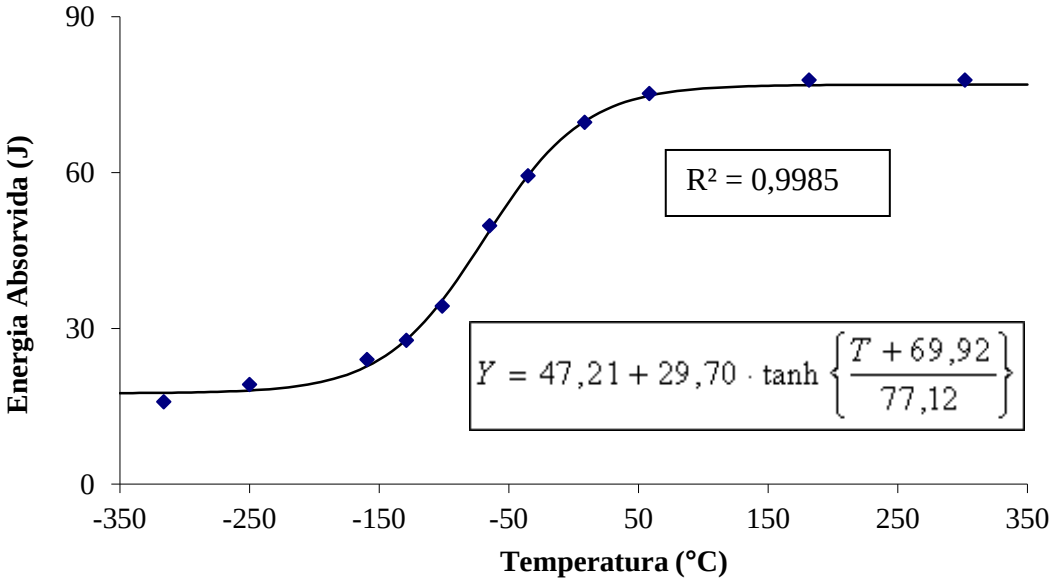


Figura 45 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 5s, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987).

Fonte: Autora

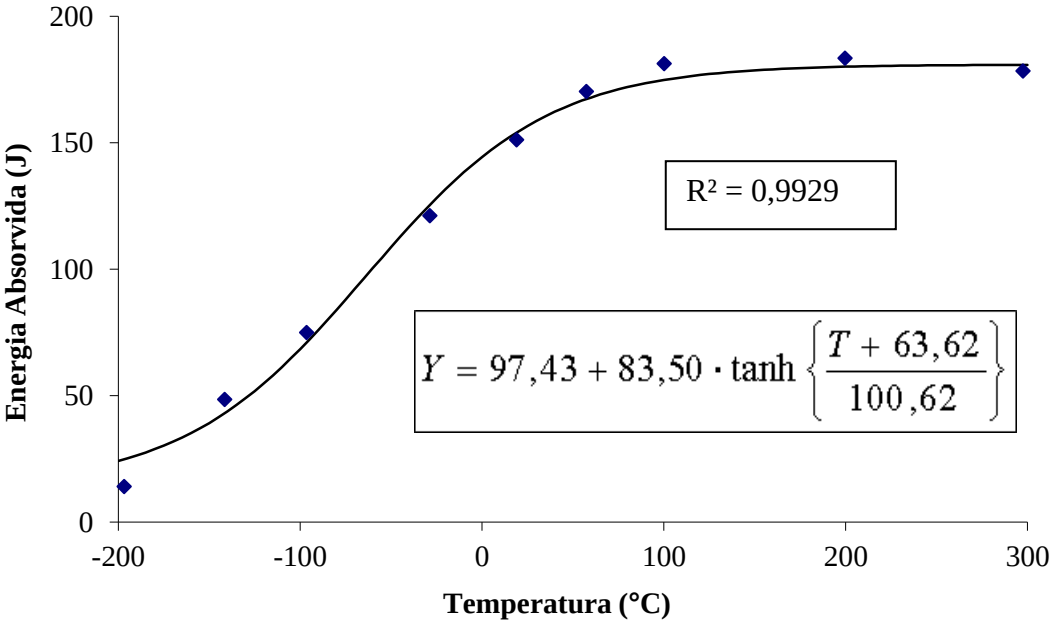


Figura 46 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cu 5 ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987).

Fonte: Autora

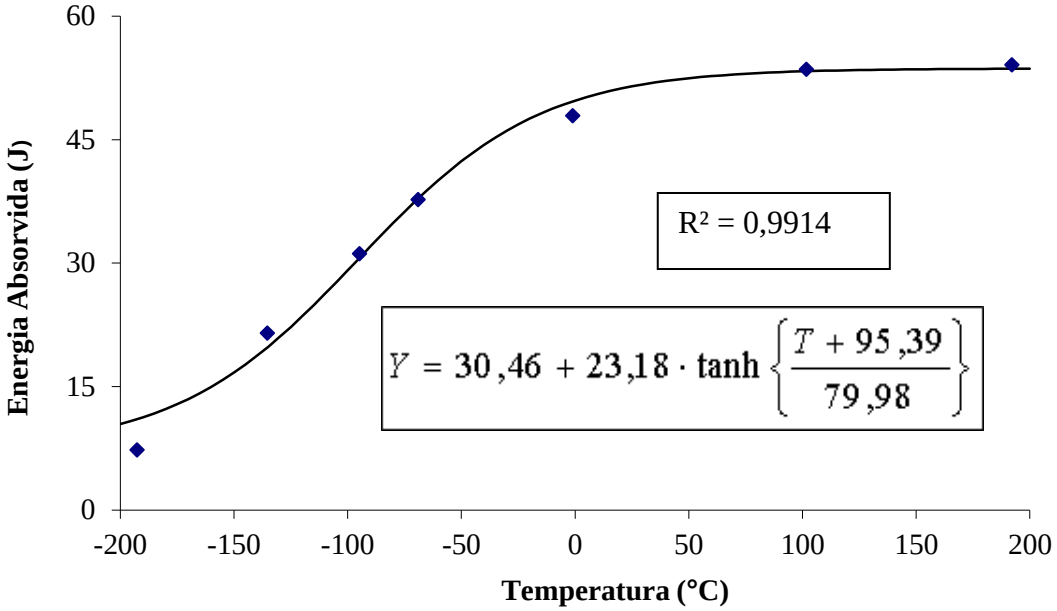


Figura 47 - Curva de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova tipo Cv 2,5, ensaiados por ensaio de impacto Charpy por Druce et al. (1987).

Fonte: Autora

Os resultados de energia absorvida no patamar superior, para cada tipo de entalhe estão sumarizados na Tabela 8, evidenciando o quanto a condição de absorção de energia é alterada quando o estado de tensões muda devido à geometria do entalhe e dimensões do corpo de prova.

Tabela 8. Energia absorvida no patamar superior para cada tipo de entalhe adotado.

Identificação do Corpo de Prova	Cv8	Cv8s	Cv5	Cv5s	Cu5	Cu2-5
Energia Absorvida (J)	285	170	117	77	184	54

Fonte: Autora adaptado de Druce et al. (1987)

As faces de fratura dos corpos de prova confeccionados com o entalhe do tipo Cv8, e ensaiados ao impacto nas diversas temperaturas também foram avaliadas. Entretanto, todos os dados destas avaliações são apresentados conforme Figura 48, que deixa evidente que não é possível avaliar os resultados obtidos quanto à fração de fratura dúctil ou frágil devido à má qualidade dos registros.

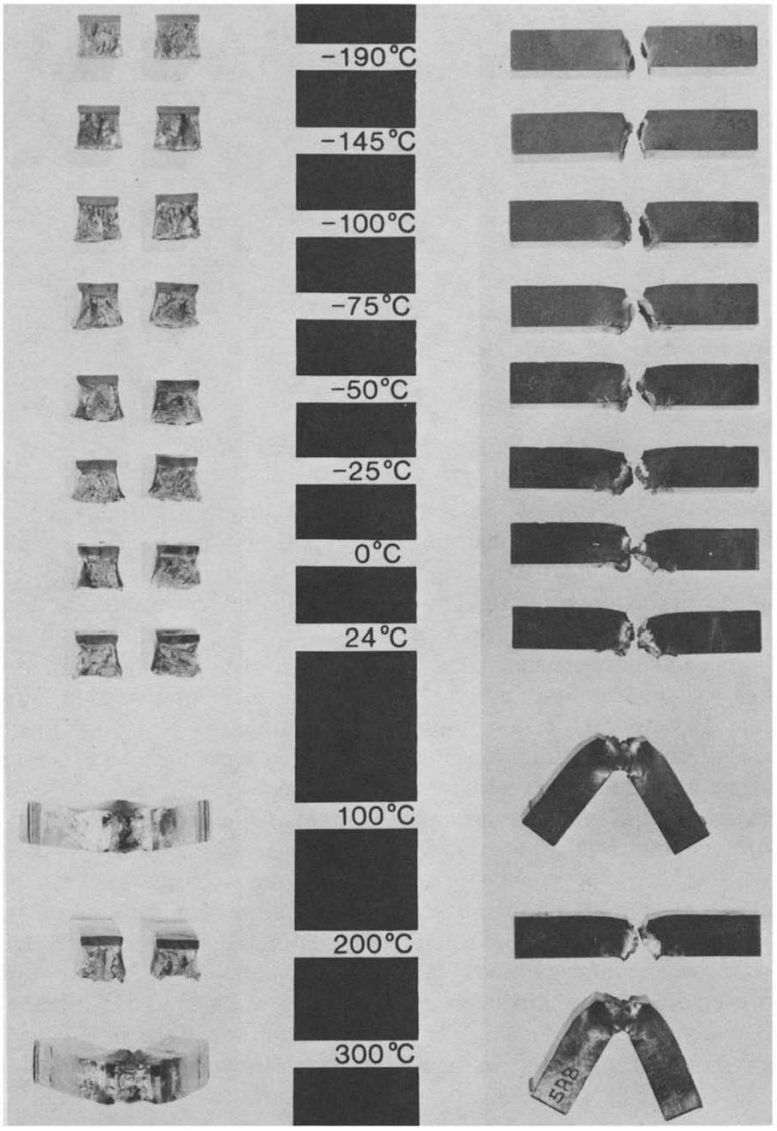
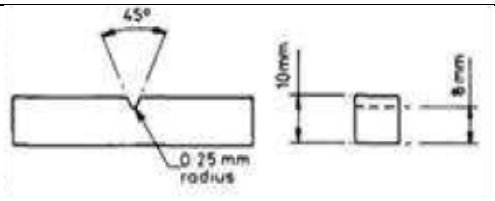
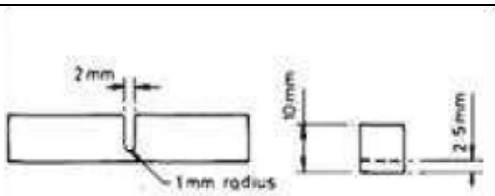
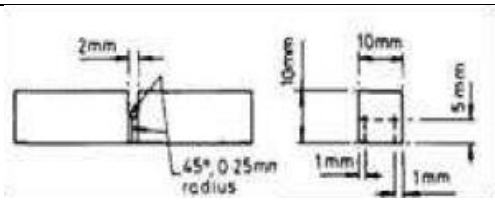
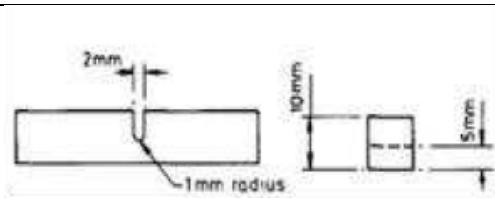
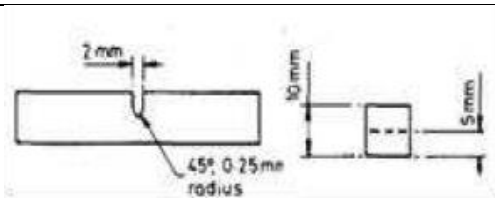
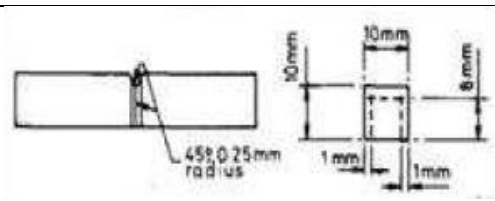


Figura 48 – Fratografia das faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto com entalhe tipo Cv8 a diversas temperaturas.

Fonte: Druce et al. (1987)

Um resumo dos resultados de TTDF para a média de energia dos patamares para cada um dos diferentes tipos de entalhe adotados é apresentado na Tabela 9, ordenados do menor para o maior valor, evidenciando o quanto o comportamento do material é alterado quando o estado de tensões muda devido à geometria do entalhe e do corpo de prova.

Tabela 9. Comparação dos valores da TTDF-mEn obtidos para as diferentes geometrias do entalhe adotados, a partir dos dados de Druce et al. (1987), calculados pelo Método da Tangente Hiperbólica.

Identificação do Corpo de Prova	Formato e Dimensões do Corpo de Prova / Entalhe	TTDF-mEn (°C)
Cv 8		-103,07
Cu 2,5		-95,39
Cv 5s		-69,92
Cu 5		-63,62
Cv 5		-49,53
Cv 8s		-39,15

Fonte: Autora

Shin et al. (2006) avaliaram a temperatura de transição de um aço API 5L X70, comparando os resultados de ensaio de impacto Charpy deste aço em duas condições

diferentes de microestrutura. O aço nomeado como ´S´ apresenta em sua microestrutura principalmente ferrita acicular, enquanto que o aço nomeado como ´T´ apresenta ferrita poligonal e austenita retida. Os gráficos das Figuras 49 e 50 trazem os resultados obtidos pelos autores, e a Tabela 10 traz o sumário de todas as características mecânicas de cada material, onde se pode ver que a temperatura de transição do aço T declarada pelos autores é mais baixa, além de ter o patamar superior de energia absorvida um pouco inferior ao do aço S.

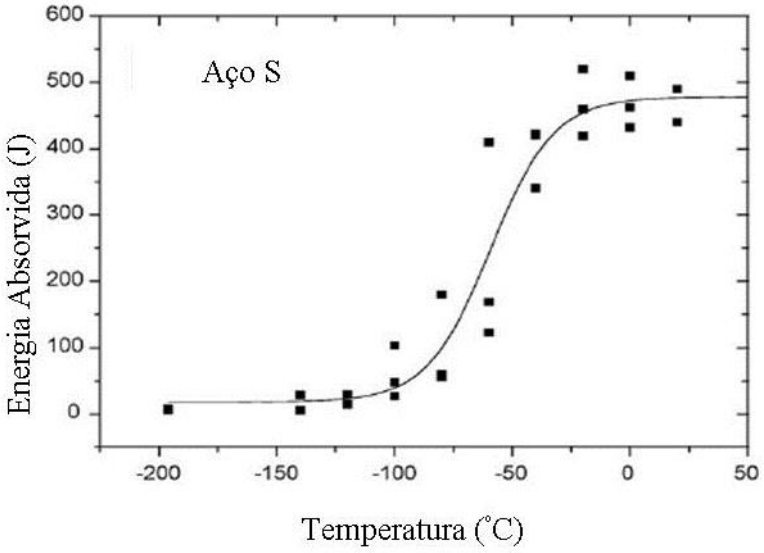


Figura 49 - Curva de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy em função da temperatura para o aço API 5L X70 com microestrutura composta principalmente por ferrita acicular.

Fonte: Shin et al. (2006)

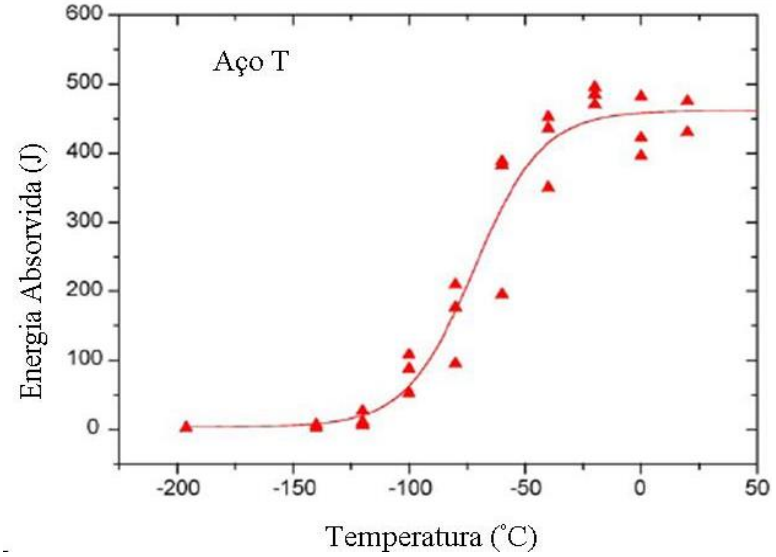


Figura 50 - Curva de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy em função da temperatura para o aço API 5L X70 com microestrutura composta por ferrita poligonal e austenita retida.

Fonte: Shin et al. (2006)

Tabela 10. Propriedades mecânicas do aço API 5L X70 e resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy.

Aço	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Taxa de Deformação (%)	Energia Patamar Superior (J)	Temperatura de Transição (°C)
S	566	691	24,4	82	478	-59
T	517	663	27,6	78	461	-72

Fonte: Autora, adaptado de Shin et al., 2006

Os dados obtidos pelos autores foram tratados pelo método da Tangente Hiperbólica, e os resultados de TTDF-mEn são apresentados na Tabela 11, juntamente com os valores de TTDF obtidos pelos autores, para facilitar a comparação. Levando em consideração que não foram utilizados os dados originais utilizados pelos autores, mas dados obtidos a partir dos gráficos fornecidos por eles, algum erro (mesmo que mínimo) pode ocorrer, o que faz que a diferença entre os valores obtidos pelo novo tratamento desses dados e os dados obtidos pelos autores seja considerada não-significativa.

Tabela 11 – Valores de TTDF-mEn obtidos a partir dos dados de Shin et al. (2006).

Aço	TTDF-mEn (°C)	TTDF declarada por Shin et al. (2006) (°C)
S	-49,8	-59,0
T	-78,3	-72,0

Fonte: Autora

Plaut et al. (2009) apresentam seus resultados obtidos pelo ensaio do mesmo material (API 5L X70) produzido por laminação controlada. O material estudado por eles foi produzido sob diferentes condições de deformação aplicadas na fase de acabamento, e o objetivo do trabalho foi estabelecer uma relação entre esta deformação e a tenacidade do material. Neste trabalho, os autores chegaram à conclusão de que maiores deformações resultam em melhora significativa na resistência ao impacto do material. Como mostra a Figura 51, os autores registraram por meio de fotografias as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados por ensaio de impacto Charpy. Embora as imagens não sejam muito claras de maneira a permitir a avaliação do modo de fratura, é possível verificar a evolução da expansão lateral dos corpos de prova conforme a temperatura de ensaio é aumentada: quanto maior a temperatura, maior é a expansão lateral do material. Os dados de energia absorvida nos ensaios de impacto Charpy são mostrados na Tabela 12, evidenciando a conclusão anteriormente comentada.

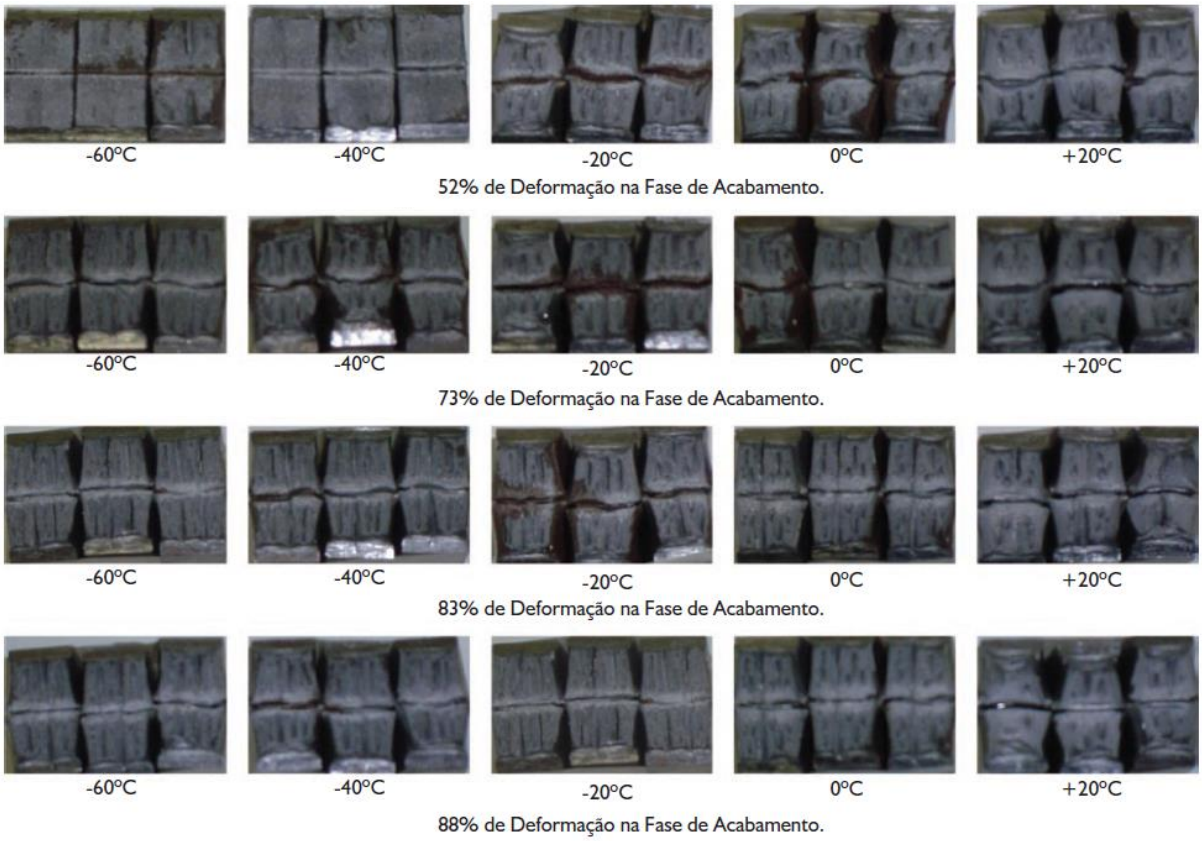


Figura 51 - Registro das faces de fratura de corpos de prova do material API 5L X70, obtidos a diversas deformações, e ensaiados a diversas temperaturas.

Fonte: Plaut et al. (2009)

Tabela 12. Resultados de energia absorvida no ensaio de impacto Charpy para o aço API 5L X70, a diversas temperaturas, sendo que o material foi produzido a diversos graus de deformação na etapa de acabamento da laminação.

	Grau de Deformação (%)			
Temperatura (°C)	52	73	83	88
-60	41	116	110	146
-40	33	129	164	194
-20	161	185	187	203
0	144	162	191	240
25	185	194	218	284

Fonte: Autora, adaptado de Plaut et al. (2009)

Utilizando o critério da Tangente Hiperbólica, os dados obtidos por esses autores foram plotados no gráfico da Figura 52. Vê-se que, para as diversas condições de deformação, há grande variação nos valores dos patamares superior e inferior de energia, enquanto que a

variação da TTDF para média dos patamares de energia não é tão grande, como mostra a Tabela 13.

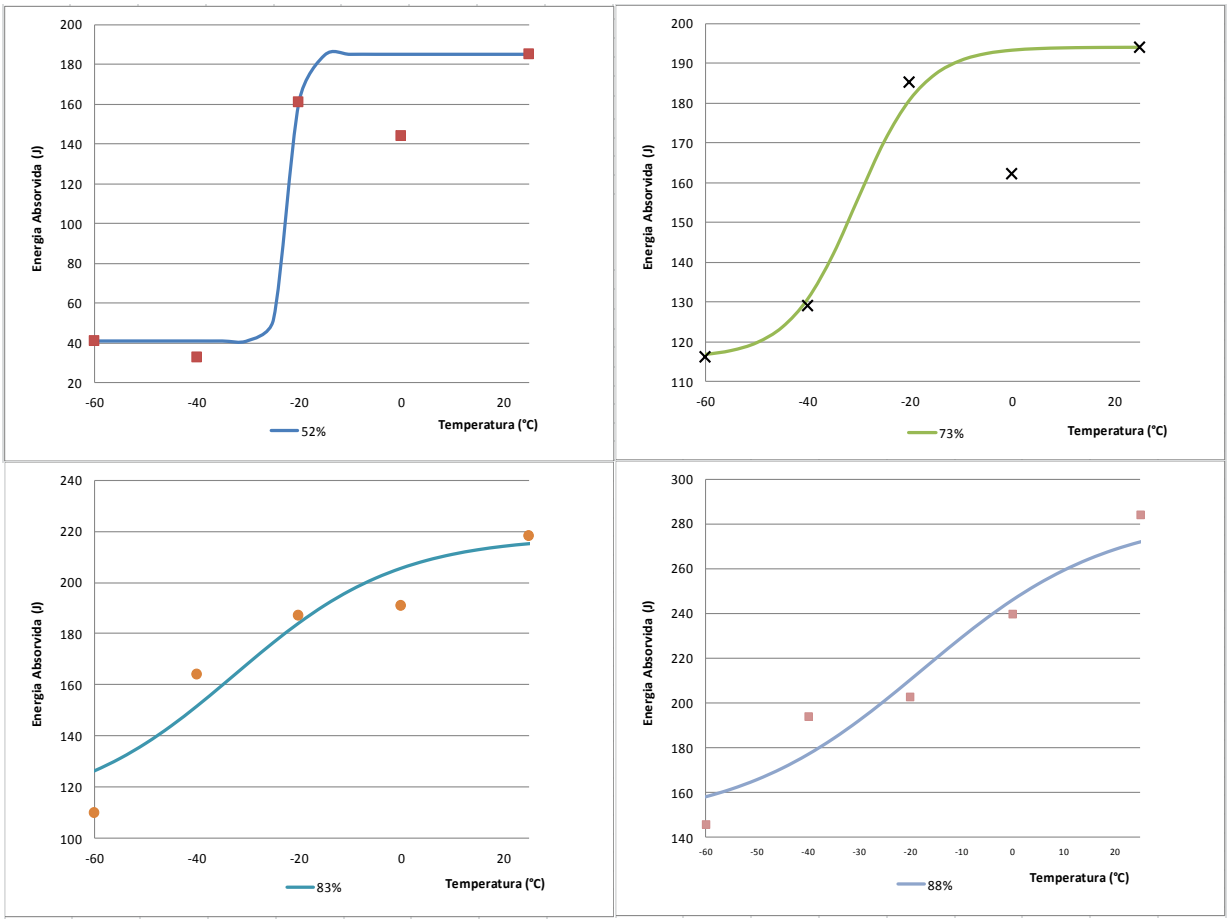


Figura 52 – Curvas de energia absorvida em função da temperatura do aço API 5L X70 sob diversas condições de deformação no acabamento da laminação, ajustadas pelo critério da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora, adaptado de Plaut et al. (2009)

Tabela 13. Resultados de TTDF-mEn para o aço API 5L X70 sob diversas condições de deformação.

	Grau de Deformação			
	52	73	83	88
TTDF-mEn (°C)	-22	-30	-32	-17

Fonte: Autora

Os autores também avaliaram o percentual de fratura dúctil em cada ensaio Charpy, em função da temperatura e da deformação aplicada no acabamento, e os dados encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14. Resultados do percentual de fratura dúctil obtido nos ensaios de impacto Charpy para o aço API 5L X70, a diversas temperaturas, sendo que o material foi produzido a diversos níveis de deformação na etapa de acabamento da laminação.

	Grau de Deformação (%)			
Temperatura (°C)	52	73	83	88
-60	24	100	100	100
-40	21	100	100	100
-20	100	100	100	100
0	100	100	100	100
25	100	100	100	100

Fonte: Autora, adaptado de Plaut et al. (2009)

Vê-se que, segundo os autores, a partir de 73% de deformação plástica observou-se 100% de fratura dúctil a qualquer uma das temperaturas utilizadas, e um valor diferente disso apenas ocorre a 52% de deformação e nas temperaturas mais baixas utilizadas. Segundo os autores, isso se dá pelo refino de grão obtido nestas condições de deformação ocorrentes na laminação controlada deste material. Entretanto, se as conclusões dos autores forem confrontadas com os gráficos de energia absorvida em função da temperatura, algumas condições divergentes podem ser observadas. É possível verificar que o material com grau de deformação de 52% apresenta transição dúctil-frágil extremamente brusca, enquanto o material com grau de deformação de 88% apresenta uma região de transição bem definida e suave, entre temperaturas de -80ºC e 35 ºC. Tal comportamento é uma evidência de que nesta região seria possível identificar o aumento gradativo na porcentagem de fratura dúctil com o aumento da temperatura, e o mesmo aconteceria com o material com graus de deformação de 83% e 73%, mesmo apresentando regiões de transição em um intervalo menor de temperaturas. Uma vez que os autores não apresentam imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura das faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto, o que seria bastante importante para confirmar o micromecanismo de fratura, presume-se que a avaliação para determinação da porcentagem de fratura dúctil ocorreu apenas pela análise visual macroscópica (conforme Figura 49), e apenas esta avaliação resultou em dados discutíveis.

Ainda utilizando estes dados, foi plotado um gráfico de porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura. Tal gráfico encontra-se na Figura 53, e se comparado ao comportamento obtido quando da avaliação da energia absorvida em função da temperatura, vê-se que não há semelhança alguma. O material nem sequer apresenta alguma região de transição quando ensaiado após deformação de 73%, 83% e 88%. Confirma-se então, mais uma vez, a divergência entre os resultados quantitativos e qualitativos, levando à conclusão de que apenas a avaliação visual pode não ser a melhor metodologia para avaliar o comportamento de tenacidade de um material em relação à temperatura.

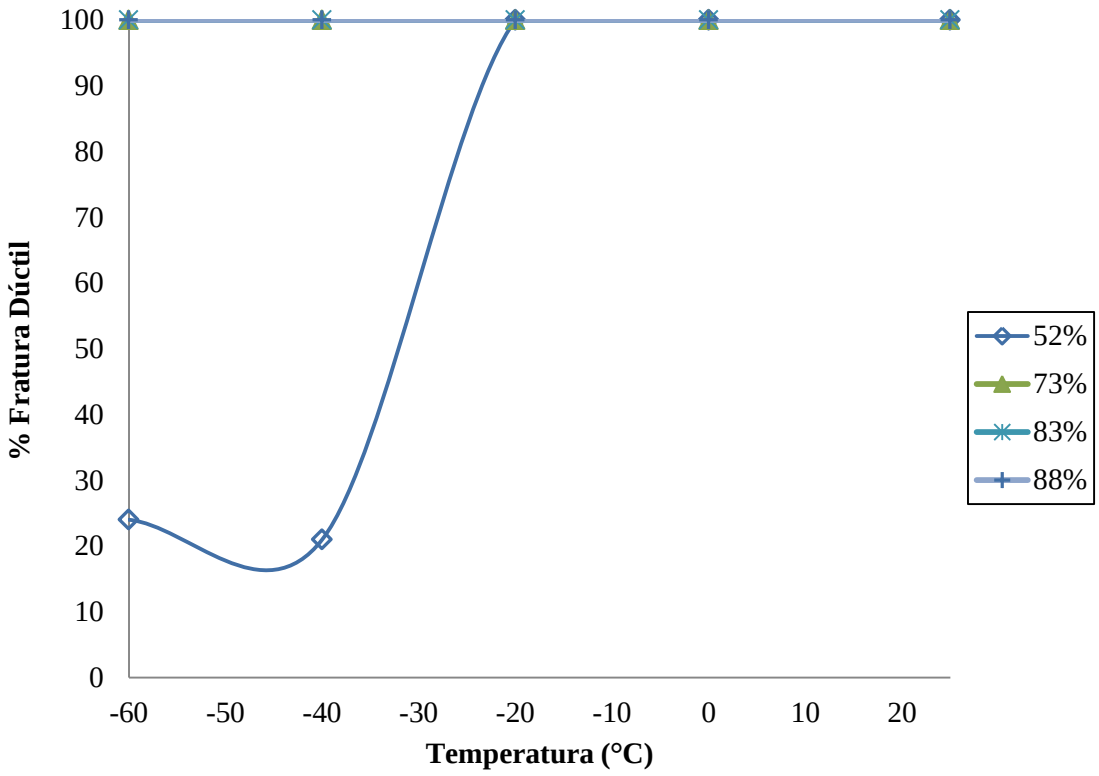


Figura 53 – Gráfico da porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura utilizando os dados de Plaut et al. (2006).

Fonte: Autora

Liu et al. (2002) também estudaram a tenacidade do aço estrutural API 5L X70 a diversas temperaturas, utilizando o ensaio de impacto Charpy. Os resultados experimentais obtidos pelos autores foram ajustados pelo método da Tangente Hiperbólica, e mostrados na Figura 54.

Vê-se que este material não apresenta uma região de transição muito bem definida, mas com esta aproximação foi possível definir a TTDF-mEn como -31°C.

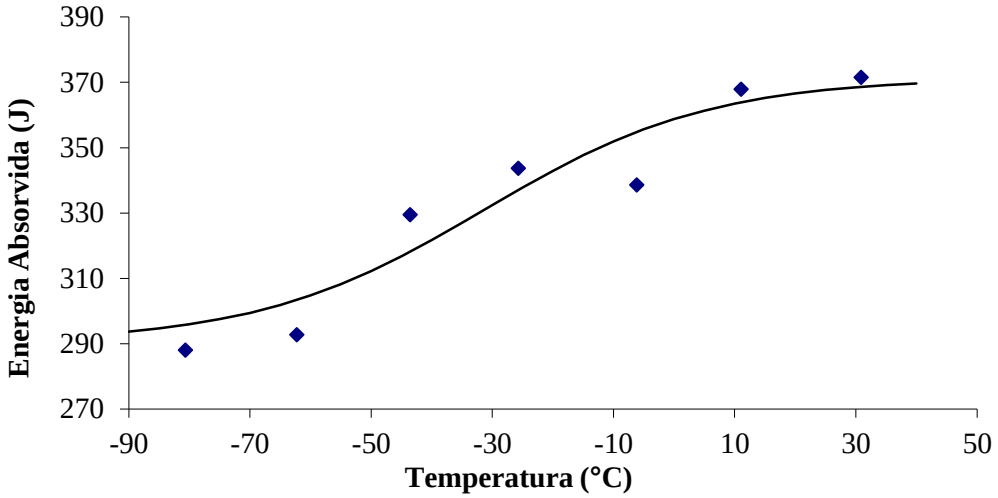


Figura 54 – Resultados de energia absorvida em função da temperatura para o aço API 5L X70 ajustados pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora, adaptado de Liu et al. (2002)

O artigo não esclarece os motivos da escolha, mas os autores escolheram as temperaturas de 193K e 213K (-80°C e -60°C), para realizarem novos ensaios, desta vez variando as velocidades do pêndulo adotadas. As faces de fratura analisadas encontram-se nas Figuras 55 e 56.

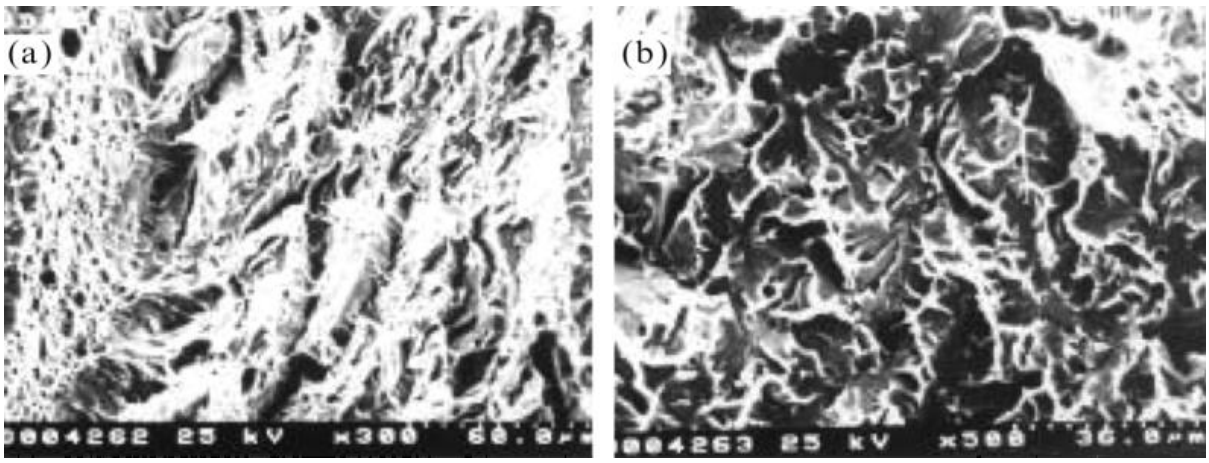


Figura 55 – Imagens das faces de fratura de um aço API 5L X70, ensaiado por ensaio de impacto Charpy à temperatura de 193K (-80°C). a) velocidade 0,003 mm/s, (b) velocidade 1000 mm/s.

Fonte: Liu et al. (2002)

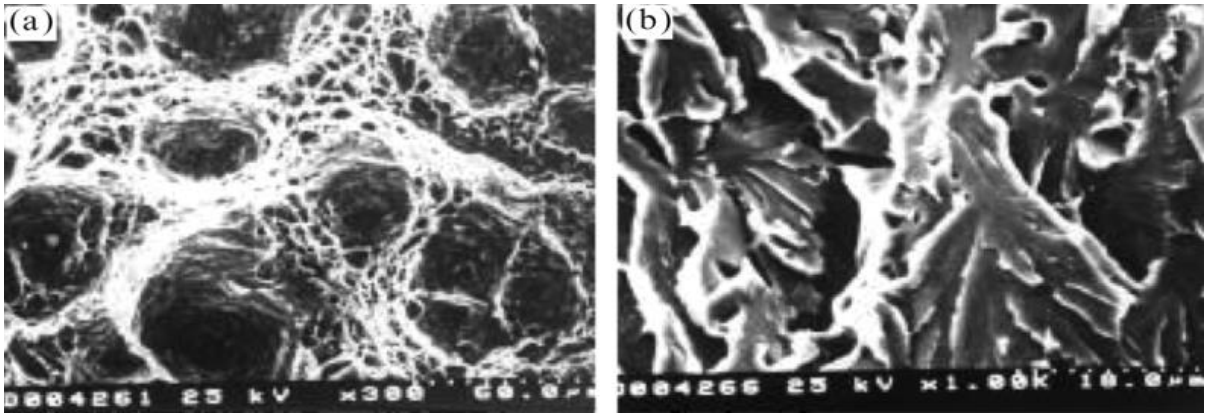


Figura 56 – Imagens das faces de fratura de um aço API 5L X70, ensaiado por ensaio de impacto Charpy à temperatura de 213K (-60°C). a) velocidade 0.01 mm/s, (b) velocidade 1000 mm/s.
Fonte: Liu et al. (2002)

Diante dos resultados de energia absorvida para estas duas temperaturas, abaixo da TTDF-mEn de -31°C, seria esperado que o material apresentasse comportamento essencialmente frágil. Entretanto, verifica-se a influência da taxa de deformação nos resultados, pois quanto menor seu valor, o material apresentou comportamento mais dúctil, pois há tempo para que maior deformação ocorra. Isso pode ser confirmado pela presença de alvéolos nas faces de fratura obtidas a menores taxas de carregamento (Figuras 55a e 56a), enquanto que tal deformação não ocorre se o carregamento ocorrer de forma muito abrupta, com a típica ocorrência de clivagem, como mostram as Figuras 55b e 56b.

Já o aço API 5L X80 foi avaliado por Joo et al. (2012). Neste trabalho, os autores avaliaram a influência da posição de retirada do corpo de prova, devido à anisotropia do material resultante de um processo de laminação. Na Figura 57 estão indicadas as direções de retirada dos corpos de prova, com entalhe transversal e paralelo ao sentido de laminação.

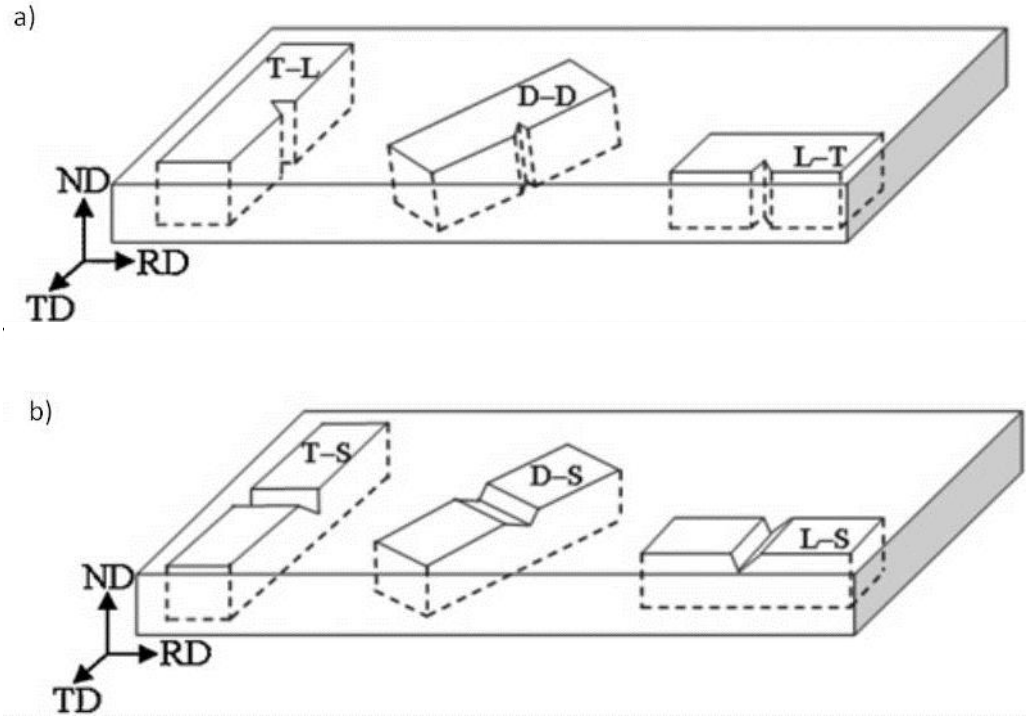


Figura 57 – Posições de retirada dos corpos de provado aço API 5L X80: a) com entalhe transversal ao sentido de laminação, b) com entalhe paralelo ao sentido de laminação.
Fonte: Joo et al. (2012)

Realizando o ajuste das curvas sobre os resultados de Joo et al. (2012) conforme o método da Tangente Hiperbólica, gerando as Figuras 58 a 60, é possível avaliar com mais precisão não apenas a influência da anisotropia nos resultados de energia absorvida em função da temperatura quanto também o impacto da posição do entalhe em relação ao sentido de laminação do material, através da definição da TTDF-mEn em cada condição. Os resultados encontram-se na Tabela 15, e pode se verificar que quando o corpo de prova é retirado a 45º do sentido de laminação, o posicionamento do entalhe não impacta na TTDF-mEn, mas quando o corpo de prova encontra-se a 0º ou 90º, o posicionamento do entalhe influencia nos resultados da TTDF-mEn. Essas informações reforçam o que foi dito a respeito das condições de retirada do corpo de prova e do entalhe: é preciso que estas condições sejam cuidadosamente definidas e declaradas quando se realiza um ensaio de impacto.

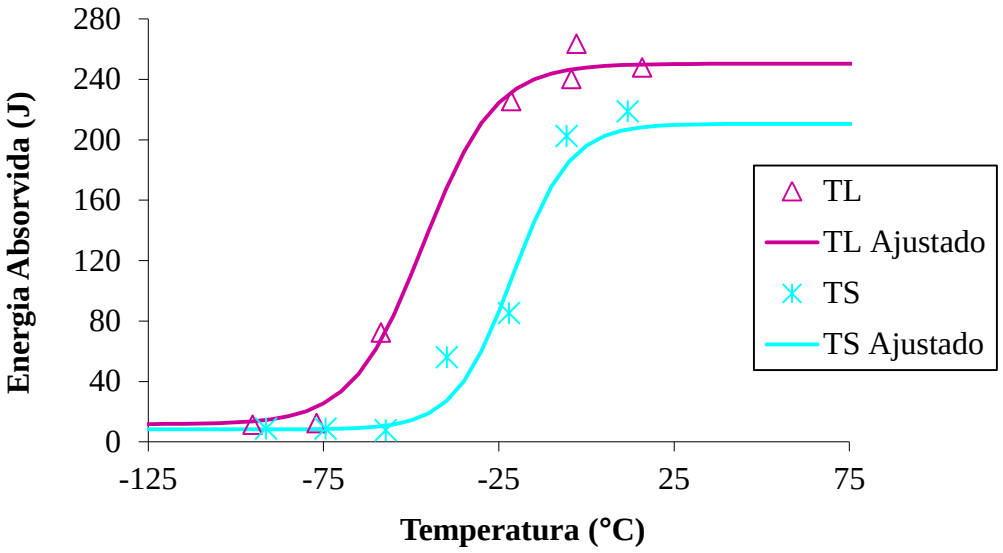


Figura 58 – Curva de energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da Tangente Hiperbólica para as diferentes posições de confecção do entalhe, para uma mesma posição de retirada do corpo de prova conforme Figuras 55a) e 55b).

Fonte: Autora, adaptado de Joo et al. (2012)

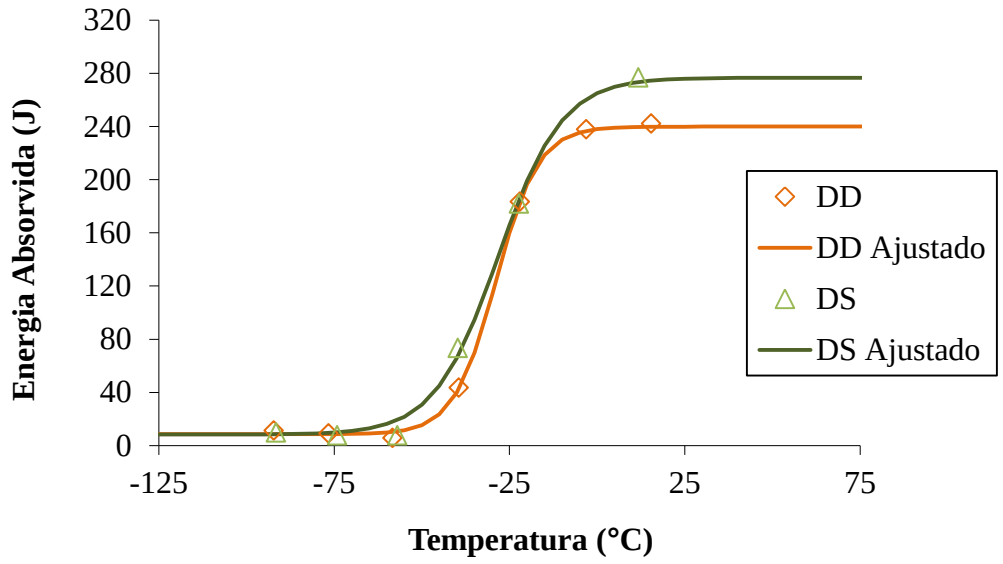


Figura 59 – Curva de energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da Tangente Hiperbólica para as diferentes posições de confecção do entalhe, para uma mesma posição de retirada do corpo de prova conforme Figuras 55a) e 55b).

Fonte: Autora, adaptado de Joo et al. (2012)

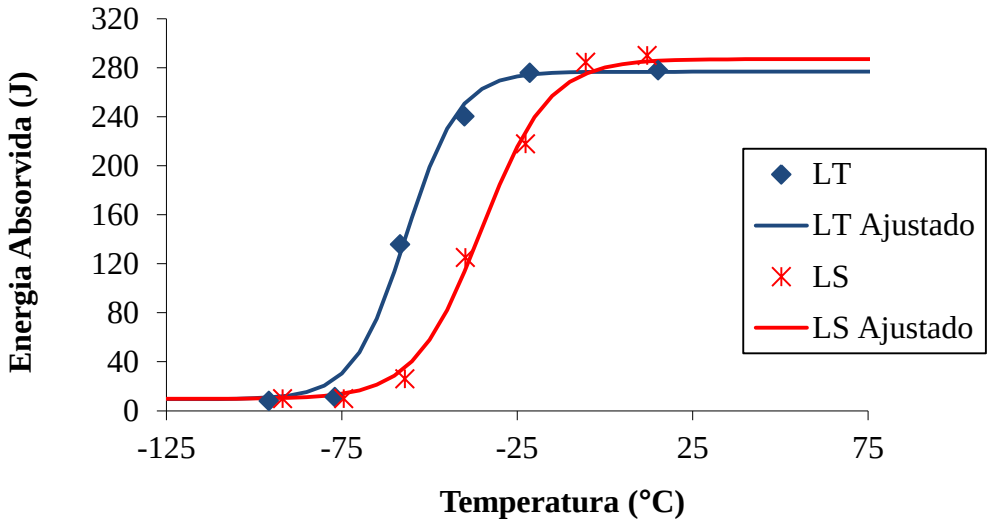


Figura 60 – Curva de energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da Tangente Hiperbólica para as diferentes posições de confecção do entalhe, para uma mesma posição de retirada do corpo de prova conforme Figuras 55a) e 55b).

Fonte: Autora, adaptado de Joo et al. (2012)

Tabela 15 – Valores de TTDF-mEn nas diferentes posições de retirada do corpo de prova, conforme Figura 55.

Posição de Retirada do Corpo de Prova	TTDF-mEn (°C)	Energia do Patamar Superior (J)
DD	-28,8	246,2
DS	-28,2	316,7
LT	-56,6	304,7
LS	-35,1	290,9
TS	-21,1	219,0
TL	-63,6	265,0

Fonte: Autora

Há, também, autores interessados em verificar o impacto da radiação na tenacidade de determinados aços estruturais, cuja aplicação é voltada a reatores nucleares. Para este tipo de avaliação, muitas vezes utilizam-se corpos de prova menores que a exigência da norma, chamados de subsized, pois é uma prática comum alocar amostras de material dentro dos reatores e ir retirando-os periodicamente para avaliação da condição do material utilizado na produção do reator. Diante desta necessidade, e de outras situações onde há limitações para retirada dos corpos de prova, e também possibilitando uma redução nos custos de materiais para teste, a utilização de corpos de prova subsized tornou-se bastante comum, e de grande

interesse entre os pesquisadores, que passaram a avaliar a relação entre os resultados de tenacidade obtidos pela utilização de corpos de prova nas dimensões da norma e corpos de prova subsized, para os mais diversos materiais. A seguir são apresentados alguns exemplos deste tipo de avaliação: utilizando corpos de prova subsized, quanto à radiação, e verificando a combinação dos dois parâmetros.

Modenezi (2009, p. 50), registrou a tenacidade de um aço inoxidável dúplex a diversas temperaturas, em corpos de prova de espessura reduzida (2,5 mm). Seus resultados geraram o gráfico da Figura 61, e utilizando o "Método da Tangente Hiperbólica" para determinar a TTDF deste material, obteve-se para este aço de alta tenacidade TTDF-mEn de -122°C.

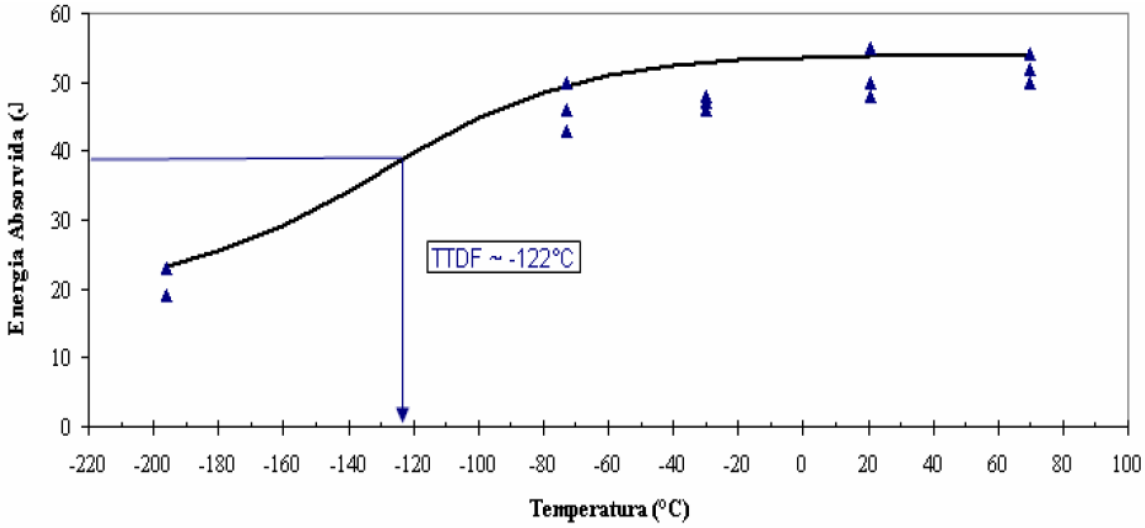


Figura 61 – Resultados de energia absorvida em função da temperatura para um aço inoxidável dúplex ensaiado por ensaio de impacto Charpy, a diversas temperaturas, e indicação da Temperatura de Transição.

Fonte: Modenezi, 2009

O mesmo autor também avaliou as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados no ensaio de impacto Charpy, que são mostradas na Figura 62.

Figura 62 - Faces de fratura de corpos de prova do aço UNS S31803, ensaiados por ensaio de impacto Charpy, a diversas temperaturas (-196°C, -73°C, -30°C, 21°C, 70°C).
Fonte: Modenezi, 2009, p. 40

Pode-se verificar a mudança no aspecto das faces de fratura dos corpos de prova ensaiados a -196ºC e a -73ºC, que são temperaturas de ensaio que se encontram antes e depois da TTDF-mEn determinada no gráfico: a expansão lateral é praticamente nula no corpo de prova ensaiado a -196ºC, enquanto que no corpo de prova a -73ºC é possível visualizar certa expansão lateral, que vai aumentando conforme a temperatura de ensaio aumenta, além de um aspecto fibroso na superfície da fratura, características de fratura dúctil.

Bouchet et al. (2005) avaliaram a influência da radiação na tenacidade de um aço estrutural A508, utilizado para vasos de pressão, conforme resultados da Figura 63.

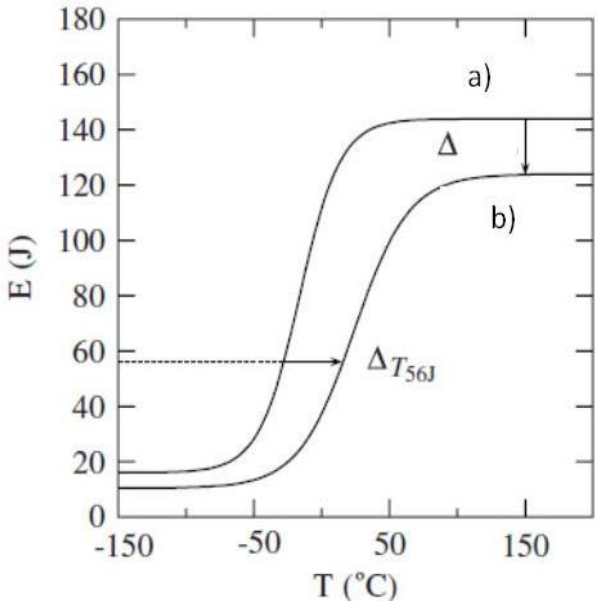


Figura 63 - Resultados de energia absorvida em função da temperatura para o aço A508 ensaiado por ensaio de impacto Charpy, (a) sem o efeito da radiação no material e (b) com o efeito da radiação no material.
Fonte: Bouchet et al., 2005

Observa-se que estes autores obtiveram como resultado que materiais submetidos à radiação apresentam menor absorção de energia do que materiais não irradiados, e que a temperatura de transição de materiais não irradiados é menor, o que traz menor criticidade à sua utilização.

Kayano et al. (1991) avaliaram a tenacidade de um aço estrutural bifásico submetido à radiação, utilizando diferentes dimensões para os corpos de prova. Os dados obtidos por eles encontram-se na Figura 64. Nota-se que os corpos de prova subsized relatados nas Figuras 64 (b) e 64 (c) apresentam valores de energia absorvida muito menores que o corpo de prova padrão (Figura 64 (a)); os autores, no entanto, informam que apesar dos corpos de prova apresentarem dimensões bem reduzidas, e portanto baixa energia absorvida, os ensaios são confiáveis, já que a máquina de ensaio usada tinha precisão de 0,01J.

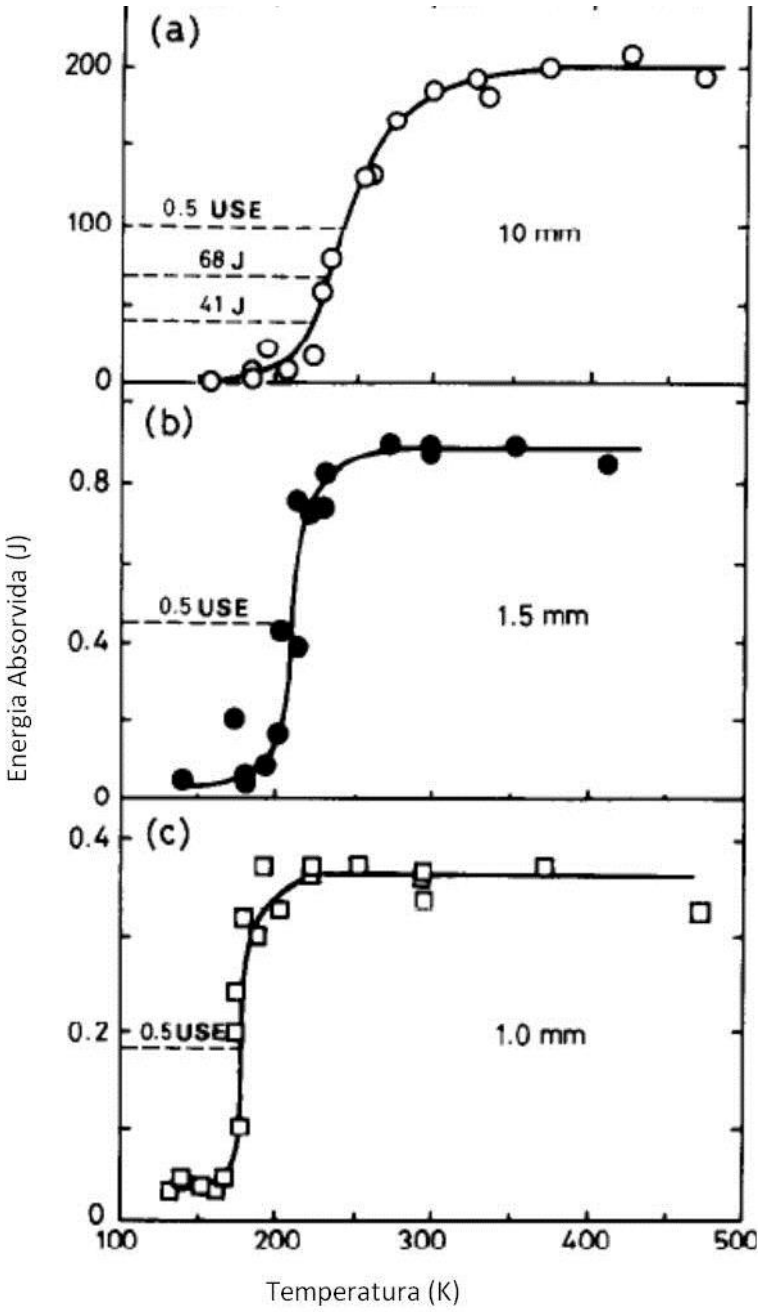


Figura 64 - Curvas de energia absorvida em função da temperatura de um aço bifásico japonês, ensaiados por ensaio de impacto Charpy, utilizando 3 diferentes dimensões.

Fonte: Kayano et al. (1991)

Vê-se a influência da mudança na espessura do corpo de prova, ou seja, este também é um fator que deve ser considerado no momento de determinar a utilização de um material, uma vez que traz alteração nas suas propriedades, diminuindo a energia absorvida no patamar superior, e movendo a temperatura de transição. Neste caso, os autores definiram a TTDF-mEn, indicando-as como ´0.5 USE´ com linhas tracejadas em cada gráfico. Tal comportamento se justifica pois quanto menor a espessura, menor será a TTDF do material,

pois a deformação plástica é facilitada nesta condição; no entanto, quanto menor a espessura, menor é o volume de material, reduzindo a energia absorvida numa determinda temperatura, como observado.

Chao et al. (2005) avaliaram a tenacidade de aço de estrutura ferrítica-martensítica (bifásico) 590. Este aço é muito utilizado em chapas finas, na indústria automobilística, resultando numa condição de anisotropia significativa. Diante deste cenário, os autores utilizaram corpos de prova subsized para avaliar a tenacidade deste material paralelamente e transversalmente ao seu sentido de laminação. A posição de retirada dos corpos de prova está indicada na Figura 65, e os resultados de energia absorvida em função da temperatura obtidos pelos autores em cada direção estão indicados na Figura 66, e os valores de TTDF-mEn são mostrados na Tabela 17.

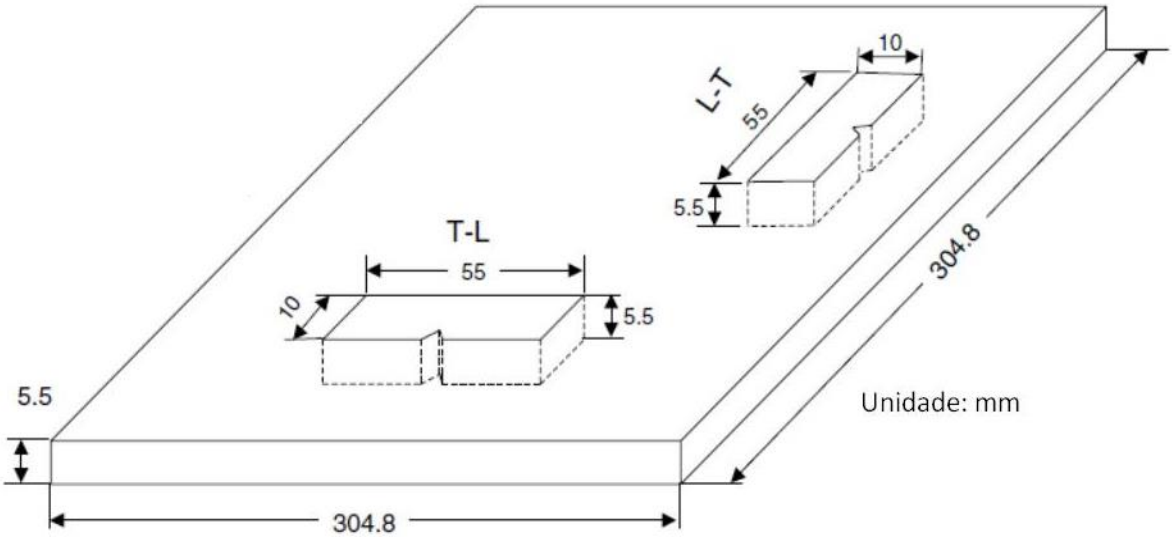


Figura 65 - Posicionamento de retirada dos corpos de prova para análise do aço bifásico 590.

Fonte: Chao et al., 2005

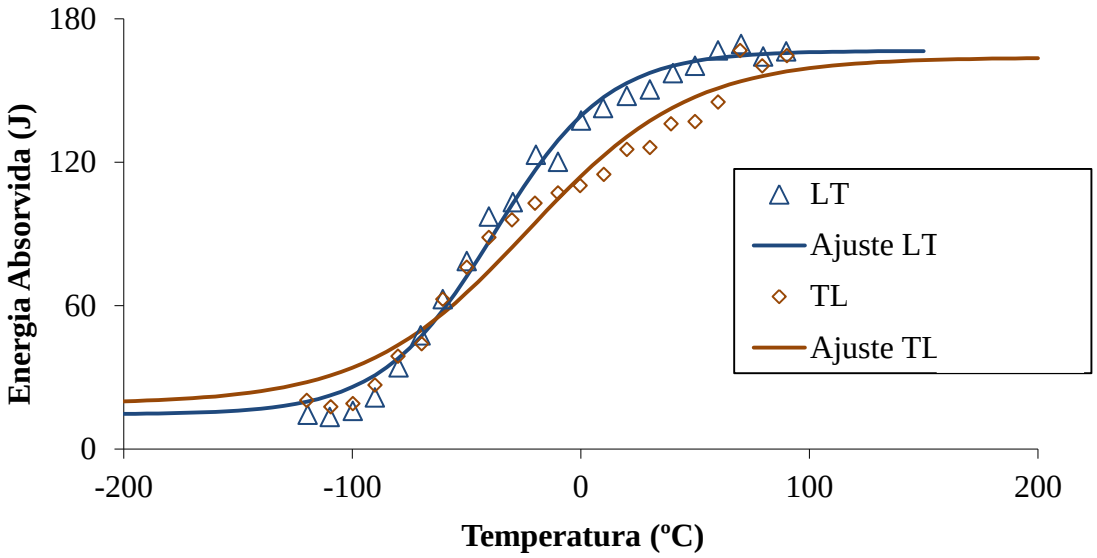


Figura 66 – Gráfico de energia absorvida em função da temperatura ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica do material bifásico 590 ensaiado por Chao et al. (2005).

Fonte: Autora, adaptado de Chao et al. (2005)

Pela análise dos dados de Chao et al. (2005), vê-se que o posicionamento do corpo de prova interfere no comportamento de transição do material, considerando a TTDF-mEn, além de uma certa influência, mesmo que pequena, nos valores de energia absorvida nos patamares superior e inferior. Utilizando o método da Tangente Hiperbólica, o valor da TTDF-mEn foi obtido para as duas condições de retirada dos corpos de prova de forma que se pode avaliar quão impactante é o posicionamento de retirada do corpo de prova na determinação destes valores, verificando-se na Tabela 16 que ensaiando o material cujo corpo de prova foi confeccionado na posição T-L, este apresenta menor TTDF-mEn.

Tabela 16 – Valores de TTDF-mEn do aço bifásico 590 ensaiado por Chao et al. (2005).

Posição de Retirada do Corpo de Prova	TTDF-mEn (°C)
L-T	-37,8
T-L	-23,2

Fonte: Autora

Magnabosco e Rosseto (1999) ensaiaram por impacto dois aços de alta resistência e baixa liga: um aço com estrutura ferrítica-martensítica (bifásico) e um aço com estrutura

ferrítica-perlítica refinada. Ambos os materiais são laminados, ou seja, foram deformados mecanicamente, e por isso apresentam sentido preferencial em suas fibras. Os corpos de prova foram, portanto obtidos nos sentidos transversal e longitudinal relativamente ao sentido de laminação, conforme Figura 67, de chapas de 2,5 mm de espessura, usando-se portanto corpos de prova menos espessos que os padronizados.

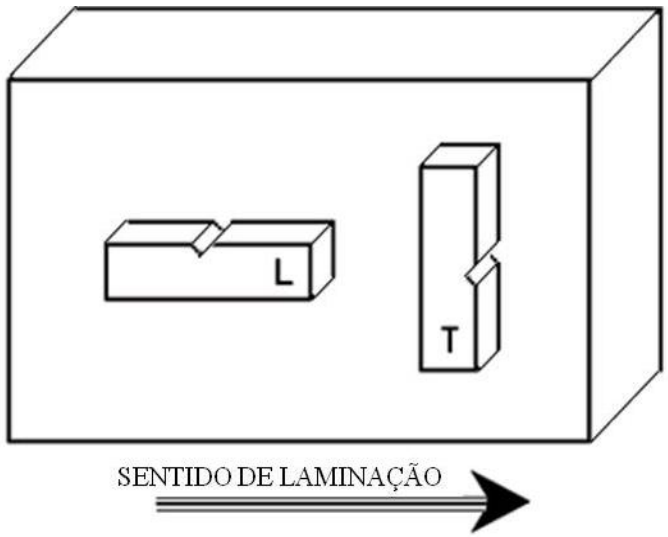


Figura 67 - Orientação dos corpos-de-prova em relação ao sentido de laminação do material.
Fonte: Magnabosco, R.; Rosseto, L.C., 1999

Os dados obtidos por Magnabosco e Rosseto (1999) foram tratados pelo método da Tangente Hiperbólica, visando definir a influência da anisotropia do material na TTDF-mEn. Os gráficos obtidos a partir do tratamento dos dados encontram-se na Figura 68, enquanto que os valores de TTDF-mEn são mostrados na Tabela 17.

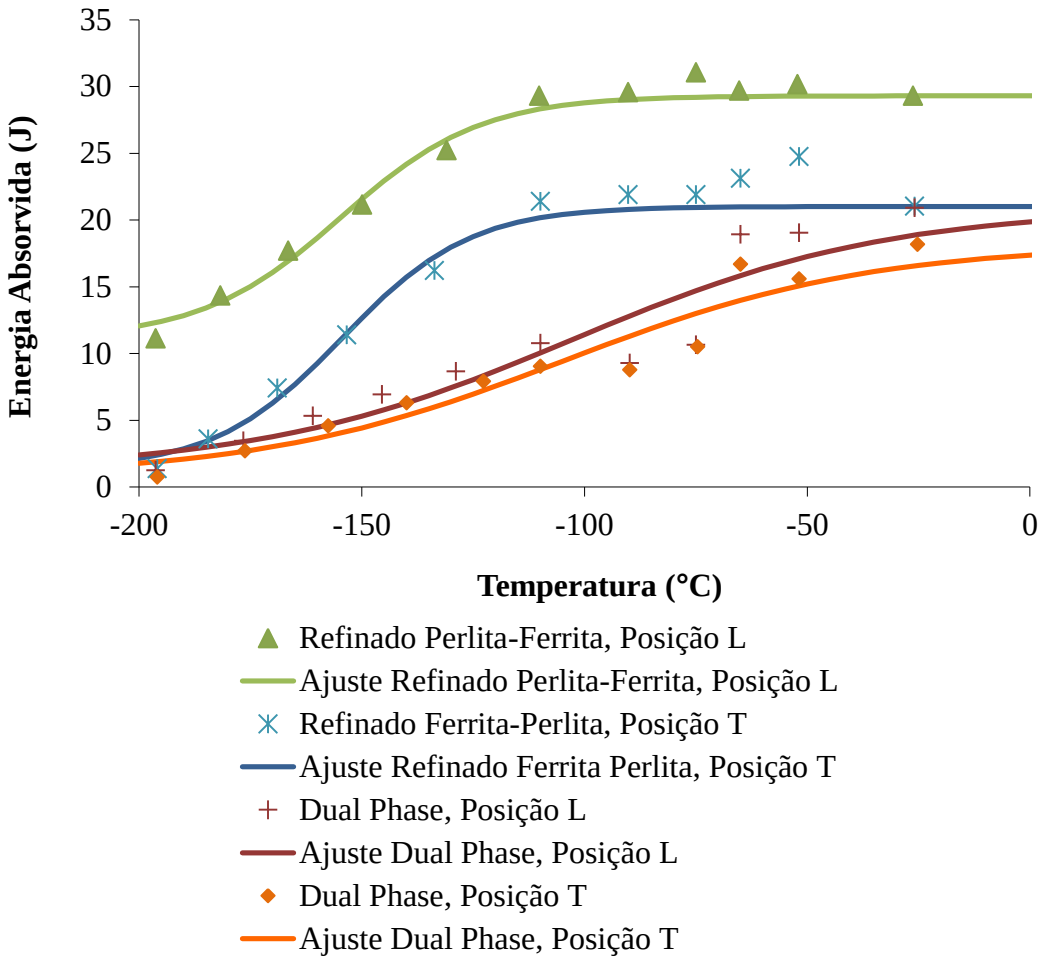


Figura 68 - Resultados de energia absorvida em função da temperatura obtidos para 2 aços de alta resistência e baixa liga, tendo sido retirados corpos de prova nos sentidos longitudinal (L) e transversal (T), conforme indicação na Figura 67.

Fonte: Magnabosco, R.; Rosseto, L.C., 1999

Tabela 17 – Valores de TTDF (em °C) obtidos a partir do tratamento dos dados de ensaio de impacto para 2 aços diferentes em 2 posições diferentes de retirada do corpo de prova.

	Posição de Retirada do Corpo de Prova	
Material	L	T
Refinado Ferrita-Perlita	-154,6	-154,3
Bifásico	-102,4	-104,7

Fonte: Autora

Observou-se que os corpos-de-prova obtidos no sentido longitudinal apresentaram maior tenacidade, uma vez que a energia absorvida no patamar superior é maior que a energia de patamar superior obtida nos corpos de prova obtidos no sentido transversal, embora não haja diferença significativa na TTDF-mEn entre as diferentes posições de retirada dos corpos de prova. Ou seja, novamente vê-se que a anisotropia gerada pela deformação mecânica do material impacta em seu comportamento mecânico.

Hertzberg (1996, p.380) registrou as faces de fratura do aço ASTM A36, aço estudado por este estudo conforme Figura 69. Avaliando as faces de fratura desse trabalho, vê-se que o micromecanismo de fratura frágil inicia-se entre 16°C e 24°C, sendo que a porcentagem de fratura frágil (área clara) aumenta com a diminuição da temperatura. Tais valores servem de referência para os resultados iniciais a serem obtidos por este estudo, apesar da referência não apresentar a curva de energia absorvida ou de expansão lateral em função da temperatura de ensaio, e de haverem poucos dados a respeito deste material disponíveis na literatura.

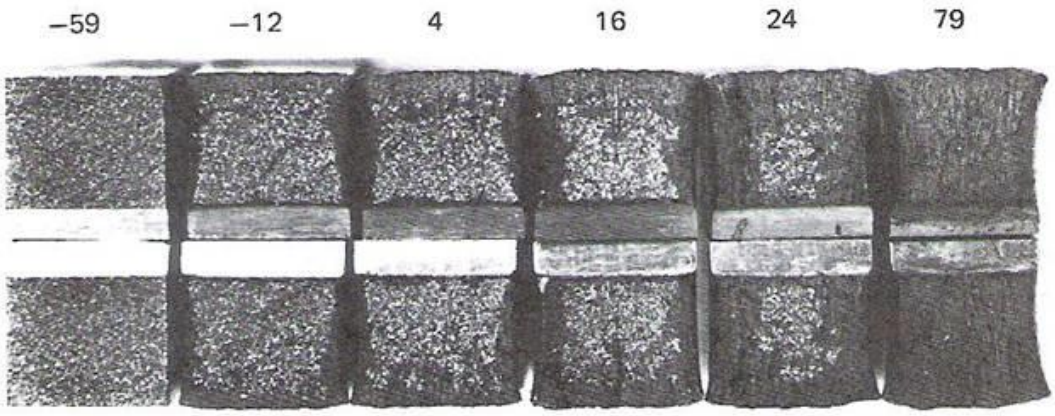


Figura 69 - Faces de fratura de corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy confeccionados com aço ASTM A36. A linha superior indica a temperatura de ensaio (em °C).

Fonte: Hertzberg, 1996

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentadas as etapas de relização deste trabalho, desde a descrição do material utilizado até a realização dos ensaios de impacto, passando pela preparação dos corpos de prova conforme norma ASTM E23 (2012).

3.1 Material utilizado

O material utilizado é o aço ASTM A36, recebido com espessura de 12,7 mm, comprimento e largura de 1m, que foi dividido para obtenção dos corpos de prova para ensaio de tração e ensaio de impacto conforme Figura 70.

O material foi utilizado em conjunto com o mestrando Fabio Cavalcanti, orientado do Prof. Gustavo H. B. Donato, também do Centro Universitário da FEI, e por este motivo foram obtidos corpos de prova para ensaio de impacto, ensaio de tração (para caracterização do material) e ensaio de fadiga da mesma placa.

Neste estudo, 87 corpos-de-prova foram ensaiados ao impacto, tendo sido obtidos, para cada um deles, as seguintes informações em função da temperatura: energia absorvida, porcentagem de fratura dúctil pelos métodos qualitativo e quantitativo e expansão lateral, resultando em 348 análises.

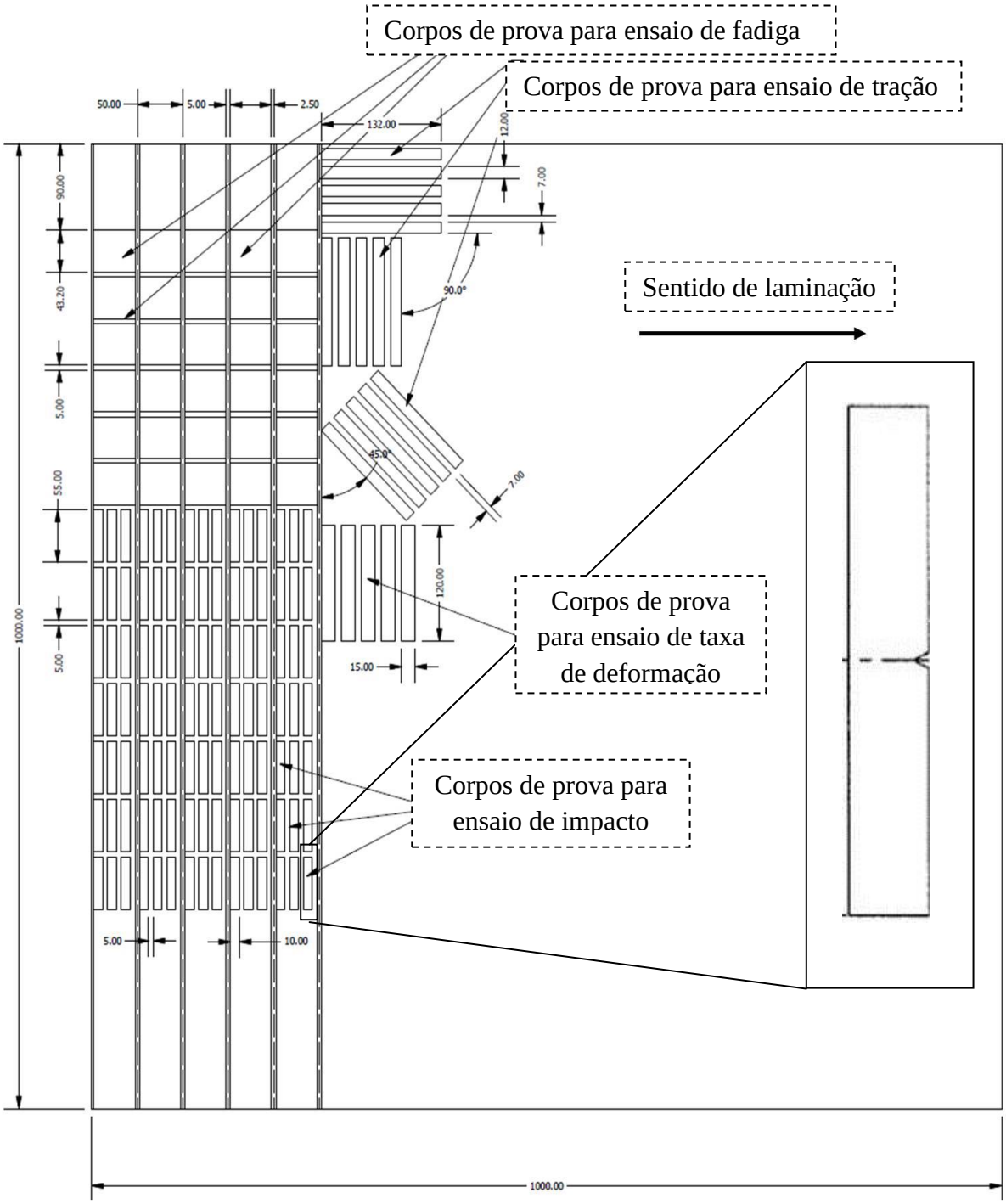


Figura 70 – Croqui de retirada dos corpos de prova na placa de aço ASTM A36.

Fonte: Autora

3.2 Métodos

Análise metalográfica do aço sobre superfície polida foi realizada para caracterização das inclusões presentes no material, e após ataque com Nital a 2% para caracterização de sua microestrutura. Nesta análise foi utilizado microscópio óptico, mostrado na Figura 71.

Figura 71 – Microscópio óptico utilizado para avaliação da microestrutura do material.
Fonte: Autora

A placa mostrada na Figura 70 foi dividida em seções, mostradas como tiras verticais nesta figura, que foram deformadas uniaxialmente em tração num equipamento servohidráulico MTS de 250 kN de capacidade máxima a diversos níveis, sendo que para este trabalho foram avaliadas as seções com deformações médias de 4,5% e 8,6%, além do material em seu estado de entrega, ou seja, com 0% de deformação. Fotografia do material sendo tracionado é mostrada na Figura 72, onde as demarcações no material foram utilizadas para mensurar o grau de deformação do material em sua extensão, que apresenta escoamento descontínuo. O mesmo equipamento foi utilizado para realização de ensaio de tração, com a finalidade de obter a curva tensão-deformação do material, caracterizando seu comportamento monotônico à tração.

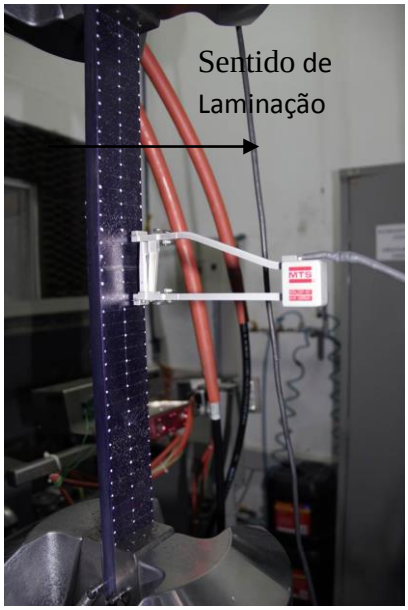


Figura 72 – Material colocado na máquina de tração para realização das deformações utilizadas nas tiras do material antes da retirada dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy.

Fonte: Autora

Foi utilizada serra de fita do Centro Universitário da FEI (Figura 73) para corte grosseiro dos corpos de prova.

Figura 73 – Serra de fita do Centro Universitário da FEI utilizada para corte grosseiro dos corpos de prova para ensaio de impacto Charpy.

Fonte: Autora

Em seguida, foram confeccionados 23 corpos de prova padrão, conforme norma ASTM E23 (2012).O entalhe foi confeccionado em brochadeira manual do Centro Universitário da FEI, que é apresentada na Figura 74.

Figura 74 – Indicação do sentido de retirada do corpo de prova em relação ao sentido de laminação do material.

Fonte: Autora

Como resultado, os corpos de prova foram obtidos conforme solicitado pela norma ASTM E23 (2012). Um exemplo de corpo de prova é mostrado na Figura 75.

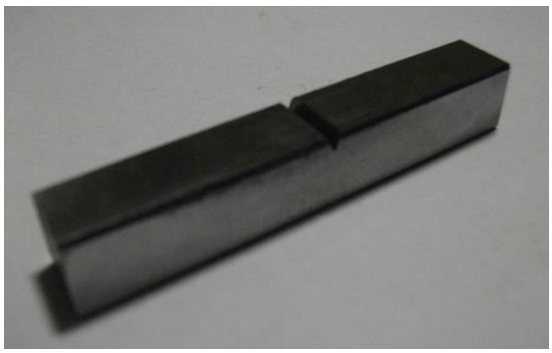


Figura 75 – Corpos de prova confeccionados para realização deste trabalho.

Fonte: Autora

O conjunto de corpos de prova do material foram ensaiados em oito temperaturas diferentes, entre 66°C e -196°C.

Para que os corpos de prova atingissem temperaturas inferiores a ambiente ou superiores a -196°C, os mesmos foram mergulhados por 10 minutos (para estabilização e homogeinização da temperatura no corpo de prova) em solução de álcool etílico e gelo seco, em diversas frações de cada um dos componentes, até que a temperatura se estabilizasse, sendo que a leitura desta temperatura foi realizada por um termopar do tipo K imerso no banho utilizado, conforme mostrado na Figura 76. Para temperaturas superiores a ambiente utilizou-se estufa, mostrada na Figura 77, e para os ensaios a -196°C os corpos de prova foram imersos em nitrogênio líquido por 5 min antes do ensaio.

Figura 76 – Registro do banho utilizado para imersão dos corpos de prova para atendimento às temperaturas desejadas para ensaio dos materiais ao impacto e o posicionamento do termopar utilizado para conferência da temperatura.

Fonte: Autora

Figura 77 – Estufa utilizada para estabilizar os corpos de prova a temperaturas mais altas que a ambiente, antes do ensaio de impacto Charpy.

Fonte: Autora

Após a estabilização da temperatura do corpo de prova propiciada pela manutenção do mesmo por 10 min na temperatura desejada, o mesmo era colocado imediatamente na máquina de ensaio (Figura 78) e em seguida o pêndulo de capacidade de 300J era liberado. Todo este procedimento foi realizado em menos de 5 segundos, seguindo a norma ASTM E23 (2012).

Figura 78 – Máquina de Ensaio Charpy do Centro Universitário da FEI.

Fonte: Autora

A medição da expansão lateral dos corpos de prova foi realizada em um medidor de perfis, que é mostrado na Figura 79.

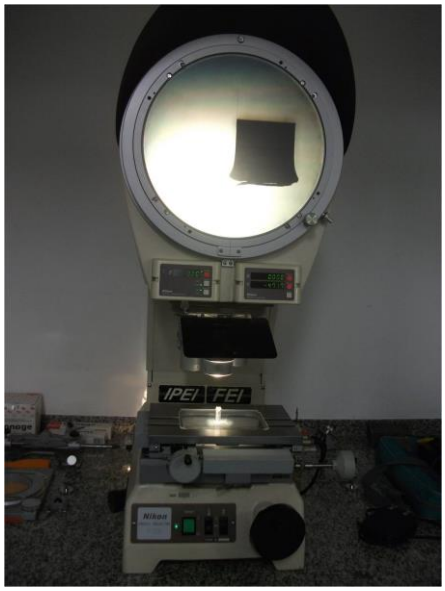


Figura 79 – Projetor de Perfis do Centro Universitário da FEI.

Fonte: Autora

Além da medição da expansão lateral, também foram realizadas avaliações de algumas faces de fratura selecionadas por Microscopia Eletrônica de Varredura utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura modelo CAMSCAN CS3200LV, mostrado na Figura 80, para identificação dos micromecanismos de fratura presentes.

Figura 80 – Microscópio Eletrônico de Varredura do Centro Universitário da FEI.

Fonte: Autora

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos quanto à caracterização do material e após a realização dos ensaios. Também são apresentadas discussões sobre esses resultados, que levarão à posterior definição das conclusões deste trabalho.

4.1 Análise microestrutural

A Figura 81 apresenta uma amostra do material sem deformação prévia que foi avaliada após lixamento e polimento. Esta visualização possibilitou a determinação do grau de inclusões presente no material conforme norma ASTM E45 (2011). O grau de inclusões encontrado foi de classe 2 heavy para inclusões de sulfeto do tipo “A” e 1 ½ heavy para inclusões globulares do tipo “D”.

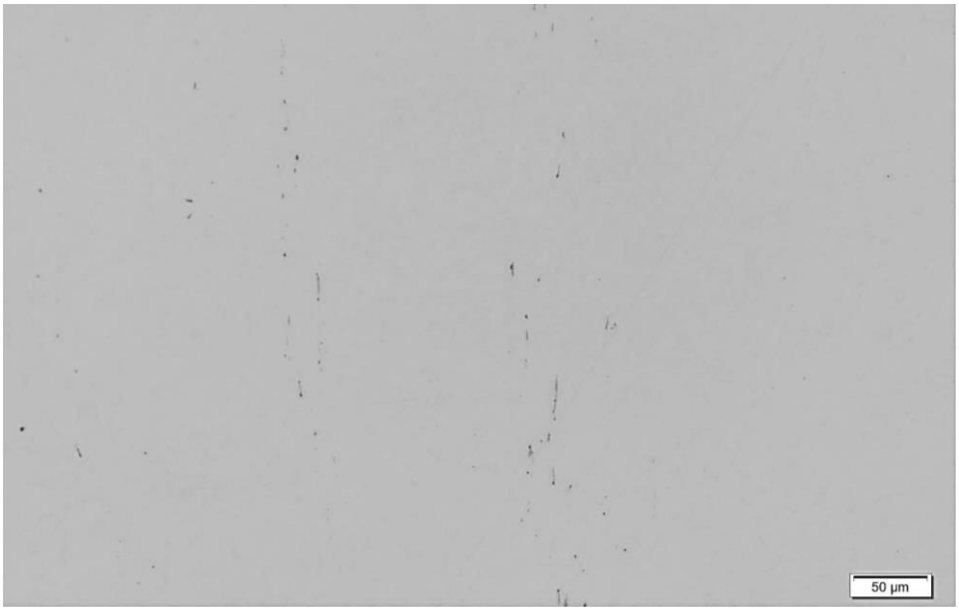


Figura 81 – Imagem de metalografia sem ataque para avaliação do nível de inclusões do material da Placa 3.
Fonte: Autora

O material apresenta estrutura ferrítica-perlítica, sem modificações significativas após deformação, conforme mostram Figuras 82, 83 e 84, que mostram a microestrutura do material em suas 3 condições.

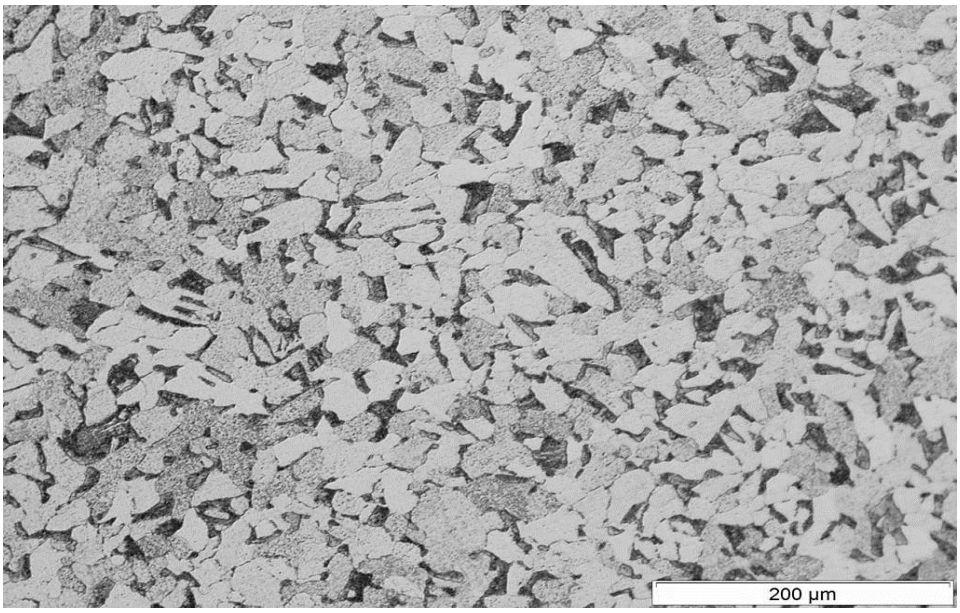


Figura 82 – Microestrutura do material sem deformação, após ataque de Nital 2%. Ferrita e perlita são observadas.

Fonte: Autora

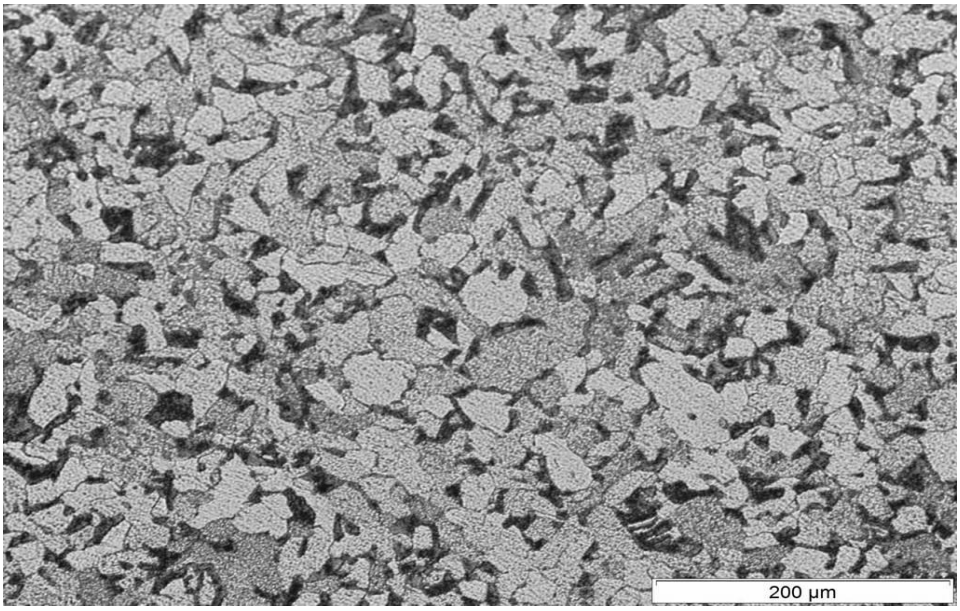


Figura 83 – Microestrutura do material com 4,5% de deformação, após ataque de Nital 2%. Ferrita e perlita são observadas.

Fonte: Autora

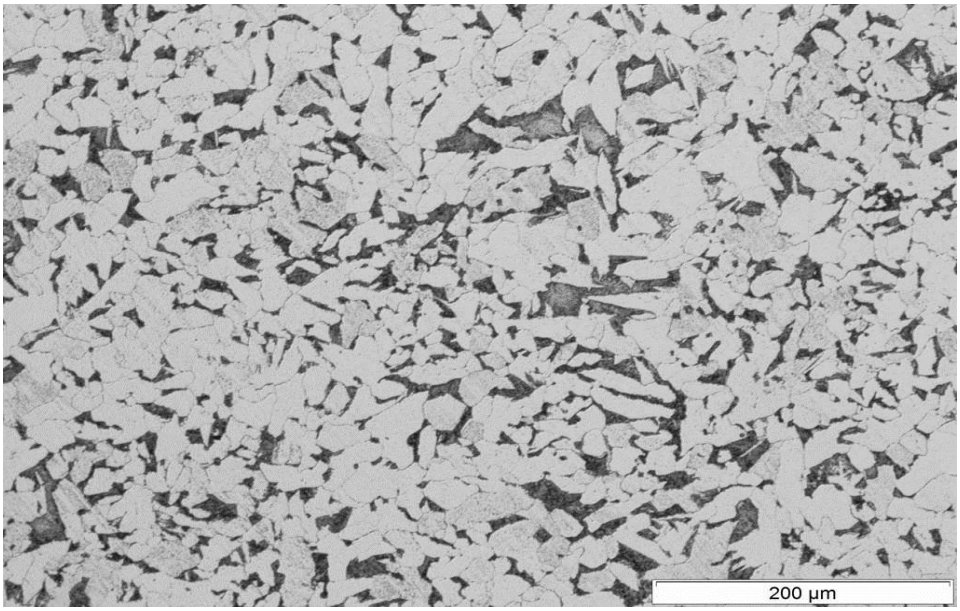


Figura 84 – Microestrutura do material com 8,6% de deformação, após ataque de Nital 2%. Ferrita e perlita são observadas.

Fonte: Autora

4.2 Ensaio de tração

A Figura 85 apresenta a curva tensão-deformação do material original, ou seja, sem pré-deformação, e nesta figura são indicados os dois valores de deformação empregados (4,5 e 8,6%), mostrando que a deformação imposta reduz a área abaixo da curva tensão-deformação, ou reduz o módulo de tenacidade do material. Deste modo, mostra-se que a pré-deformação aplicada reduz a capacidade de absorver energia do material quando solicitado nas condições do ensaio de tração, ou um carregamento quasiestático.

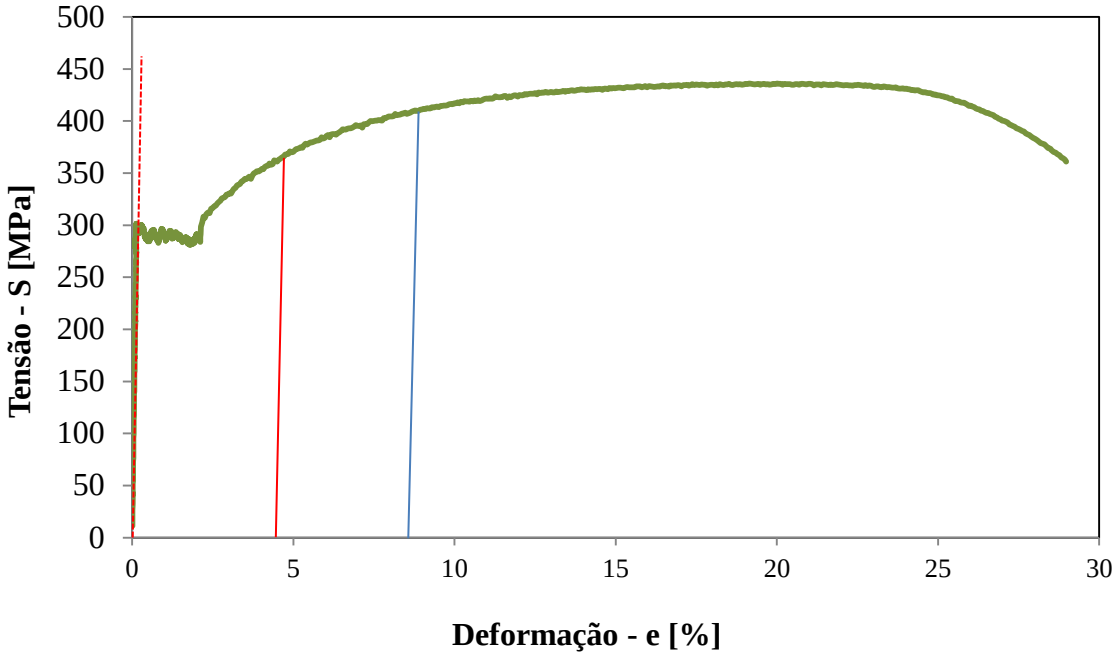


Figura 85 – Curva tensão-deformação do material sem pré-deformação. A linha pontilhada indica a inclinação referente ao trecho elástico-linear, e as linhas cheias vermelha e azul esquematizam o trecho inicial das curvas tensão-deformação para os materiais com 4,5% e 8,6% de deformação respectivamente, indicando a redução do módulo de tenacidade com o aumento da pré-deformação.

Fonte: Autora

4.3 Ensaio de impacto

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com a realização de ensaios de impacto Charpy, conforme norma ASTM E23 (2012), e a discussão dos mesmos.

4.3.1 Análise por critério de energia

Os resultados obtidos de energia absorvida em função da temperatura para os corpos de prova nas 3 condições estão registrados na Tabela 1 do Anexo A. Estes dados foram obtidos pela leitura direta dos valores de energia indicados na máquina de ensaio de impacto no momento da realização do ensaio, e foram colocados em um gráfico de energia absorvida em função da temperatura. Depois disso, esses dados foram tratados pelo método da Tangente Hiperbólica, e os gráficos obtidos encontram-se nas Figuras 86, 87 e 88. O valor do coeficiente de correlação (R^2) indicado nos gráficos refere-se ao ajuste dos pontos

experimentais com a curva da Tangente Hiperbólica. Além disso, em cada gráfico também encontra-se a equação correspondente a cada curva de ajuste.

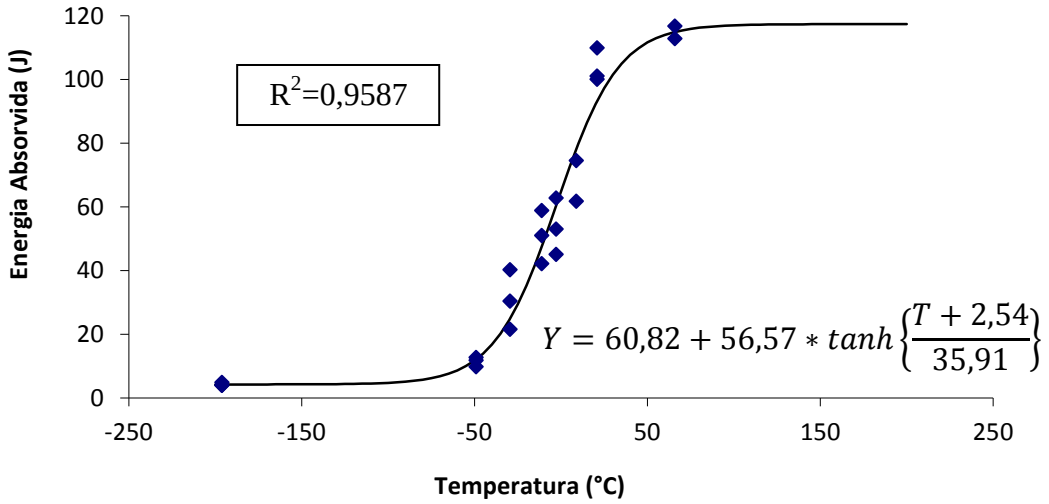


Figura 86 - Gráfico de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova do aço isento de deformação prévia ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

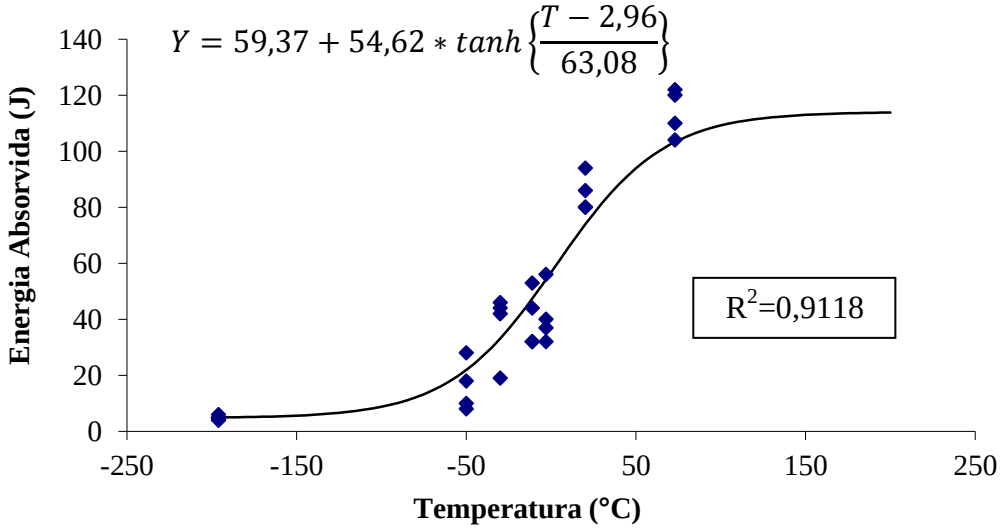


Figura 87 - Gráfico de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova do aço com 4,5% de deformação prévia ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

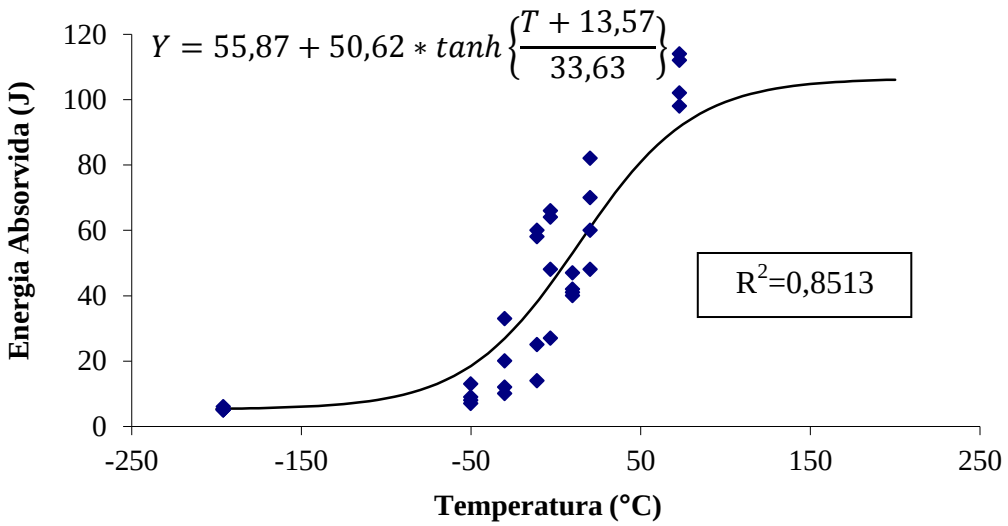


Figura 88 - Gráfico de energia absorvida em função da temperatura dos corpos de prova do aço com 8,6% de deformação prévia ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.
Fonte: Autora

Pela sobreposição das curvas de ajuste obtidas para os dados de energia absorvida em função da temperatura do material nas 3 condições, fica mais fácil avaliar a diferença no comportamento do material quanto maior é sua pré-deformação.

Apesar de ser pequena a diferença, como esperado observa-se que o material com maior deformação tem menor capacidade de absorção de energia, pois sua energia de patamar superior é menor dentre as 3, enquanto que o material sem deformação apresenta a maior energia de patamar superior, e a energia de patamar superior do material com 4,5% de deformação apresenta valor intermediário. Cabe também comentar que o material nesta última condição é aquele que apresenta maior região de transição dentre todos, ou seja, a transição entre o micromecanismo de fratura dúctil e o micromecanismo de fratura frágil ocorre de maneira mais suave do que a transição que ocorre para as demais condições de pré-deformação estudadas. O gráfico comparativo é apresentado na Figura 89 e um resumo dos resultados de TTDF-mEn, TTDF-20J e energia de patamar superior encontra-se na Tabela 18.

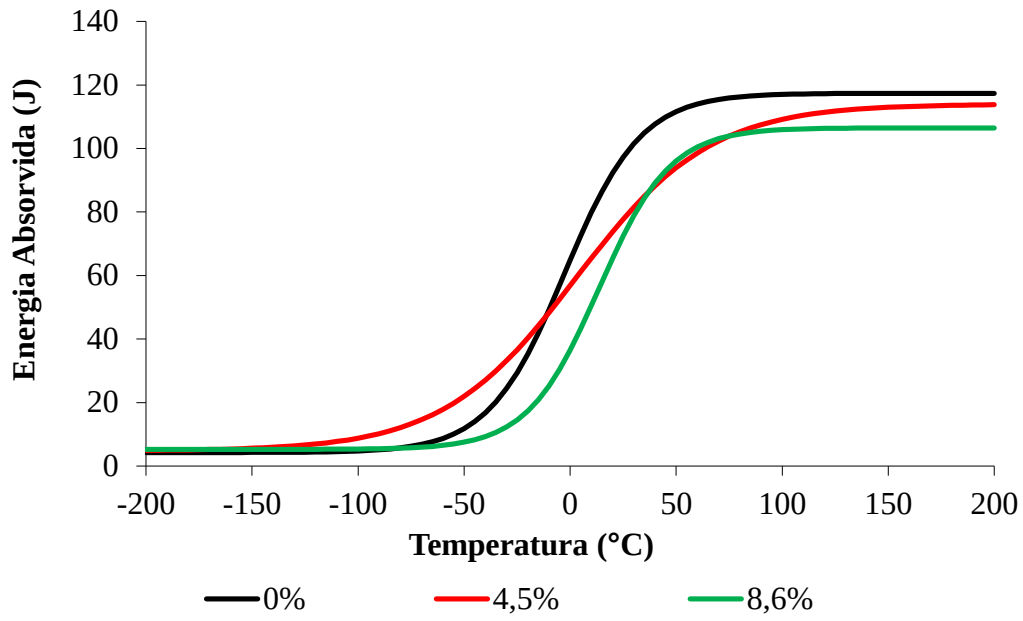


Figura 89 - Gráfico da sobreposição das curvas de energia absorvida em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de pré-deformação.

Fonte: Autora

Tabela 18 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição de deformação do material, a partir dos valores de energia absorvida em função da temperatura.

	Pré-deformação		
	0%	4,5%	8,6%
TTDF-20J (°C)	-38	-50	-18
TTDF-mEn (°C)	-2	3	14
TTDF-TFN (°C)	35	68	82
TTDF-TDN (°C)	-40	-60	-58
Energia de Patamar Superior (J)	117,4	113,8	106,5

Fonte: Autora

Com os dados obtidos, também é possível avaliar o impacto que a pré-deformação tem na TTDF. Se a TTDF-mEn for avaliada, observa-se que ocorre um aumento em seu valor quanto maior é a deformação, refletindo a diminuição na tenacidade prevista pela redução da

área abaixo da curva de tensão em função da deformação obtido no ensaio de tração do material.

Já quanto à TTDF-20J, esta apresenta um valor bem diferente dos valores de TTDF-mEn, o que era esperado, uma vez que, por observação dos gráficos, verifica-se que o valor de 20J de energia ocorre a uma temperatura no início da região de transição, enquanto que o conceito da TTDF-mEn é de representar um valor intermediário entre a ocorrência de fratura frágil e de fratura dúctil do material. Além disso, vê-se que este valor não traz informação quanto ao comportamento do material, uma vez que, há uma tendência de alteração em seu valor dependendo da pré-deformação aplicada ao material.

Por outro lado, os valores de TTDF-TFN aumentam quanto maior é a deformação do material, mostrando que este critério retrata a tendência de comportamento do material, conforme ocorre sua pré-deformação.

Sobre a TTDF-TDN, é possível comentar que ocorre sua diminuição quanto maior for a pré-deformação. Cabe comentar, no entanto, que os valores da TTDF-TDN obtidos para os materiais com pré-deformações de 4,5% e 8,6% são muito próximos, mas o valor obtido para 0% é o maior, contrariando a expectativa de que os valores de TTDF variariam de acordo com o valor de pré-deformação. Entretanto, como tais valores são determinados por aproximação das curvas de ajuste da Tangente Hiperbólica, tal inversão de valores pode ser justificada pela imprecisão que a obtenção destes valores pode ocasionar.

4.3.2 Análise por critério da expansão lateral

As Figuras de 90 a 113 trazem as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy nas temperaturas citadas anteriormente, nas 3 condições de deformação do material. Nestas imagens é possível verificar a diminuição da expansão lateral e aumento da região de fratura brilhante, que poderiam ser classificadas como fratura por clivagem, conforme a temperatura de ensaio é diminuída. Tais mudanças de comportamento do material permitiram a obtenção dos dados utilizados nos gráficos das Figuras 114 a 116.

Figura 90 – Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 66°C.

Fonte: Autora

Figura 91 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 21°C.

Fonte: Autora

Figura 92 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 9°C.

Fonte: Autora

Figura 93 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -2,7°C.

Fonte: Autora

Figura 94 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -11°C.

Fonte: Autora

Figura 95 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -29,3°C.

Fonte: Autora

Figura 96 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -49°C.

Fonte: Autora

Figura 97 - Faces de fratura dos corpos retirados da placa de material isento de deformação ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -196°C.

Fonte: Autora

Figura 98 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 73°C.

Fonte: Autora

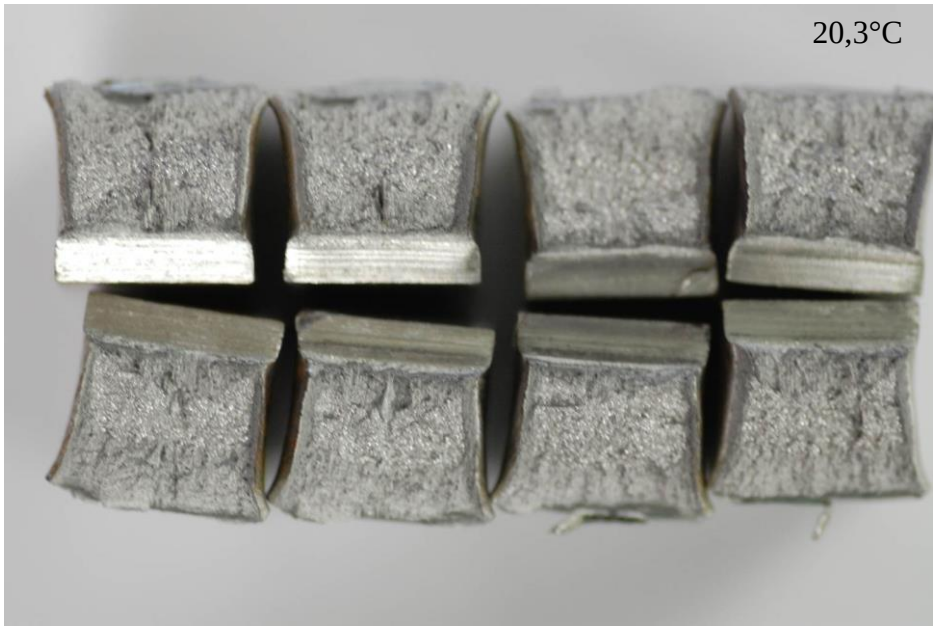


Figura 99 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 20,3°C.

Fonte: Autora

Figura 100 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 10°C.

Fonte: Autora

Figura 101 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -3°C.

Fonte: Autora

Figura 102 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -11°C.

Fonte: Autora

Figura 103 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -30°C.

Fonte: Autora

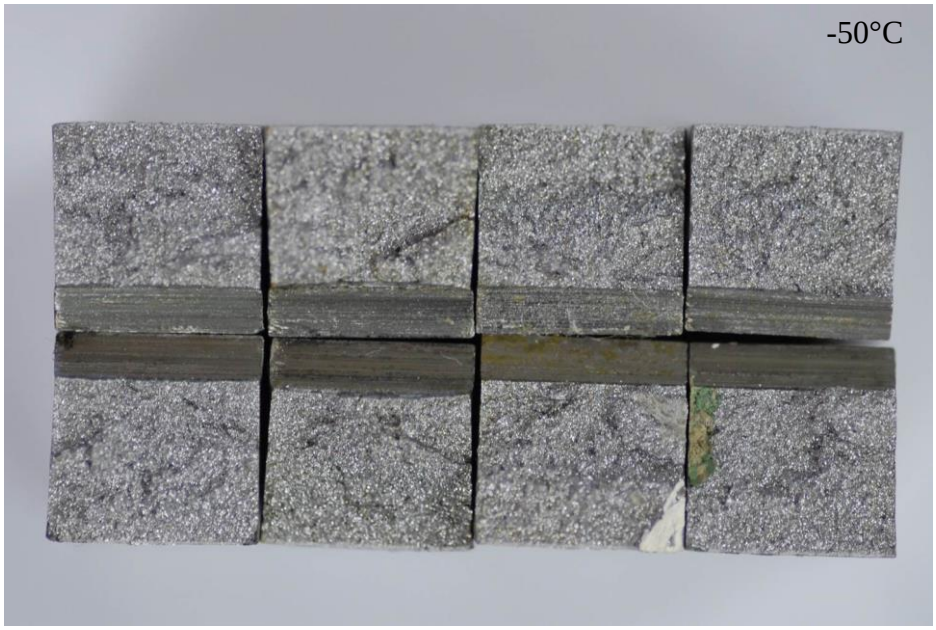


Figura 104 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -50°C.

Fonte: Autora

Figura 105 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 4,5% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -196°C.

Fonte: Autora

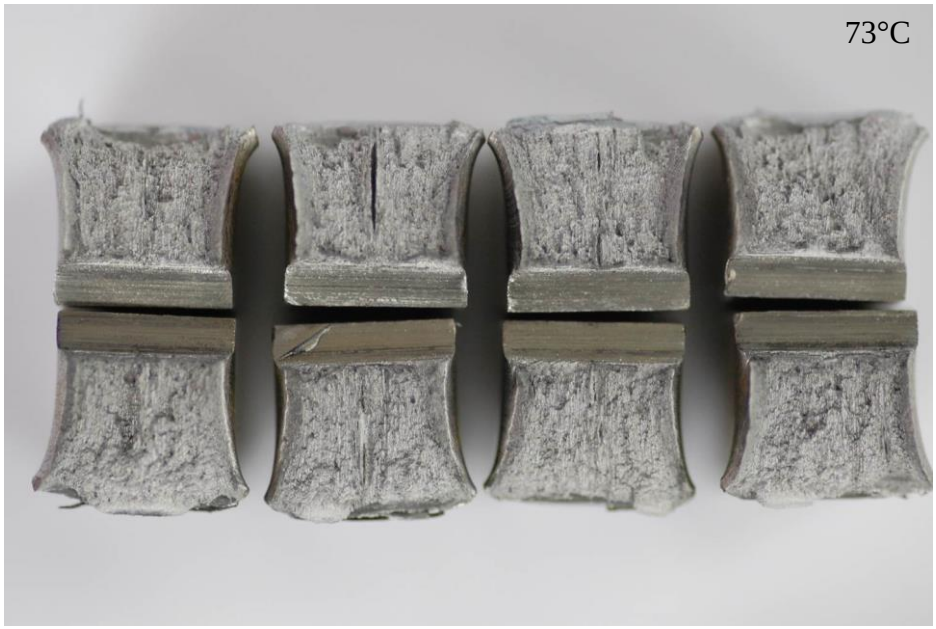


Figura 106 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 73°C.

Fonte: Autora

Figura 107 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 20,3°C.

Fonte: Autora

Figura 108 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de 10°C.

Fonte: Autora

Figura 109 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -3°C.

Fonte: Autora

Figura 110 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -11°C.

Fonte: Autora

Figura 111 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -30°C.

Fonte: Autora

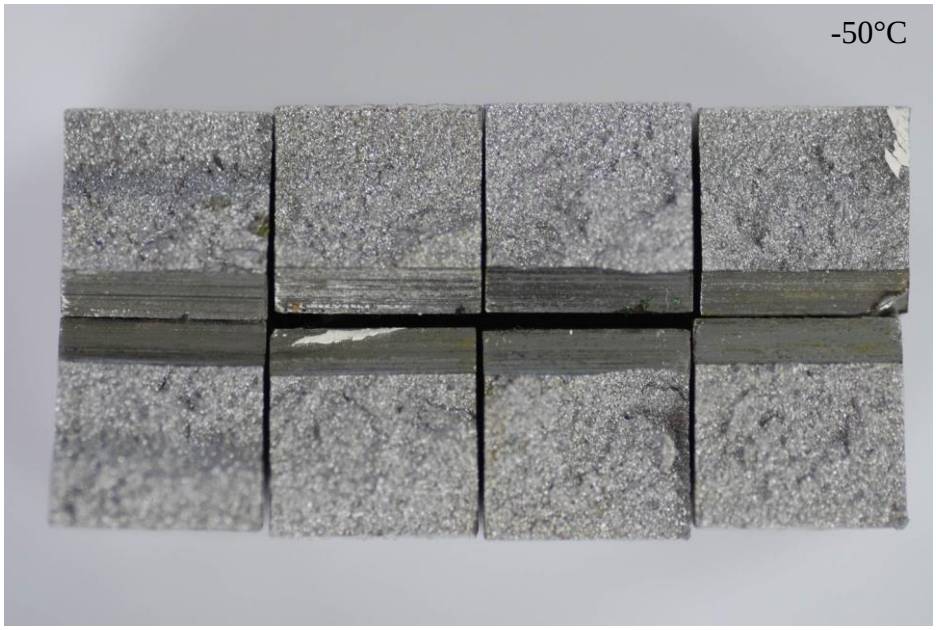


Figura 112 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -50°C.

Fonte: Autora

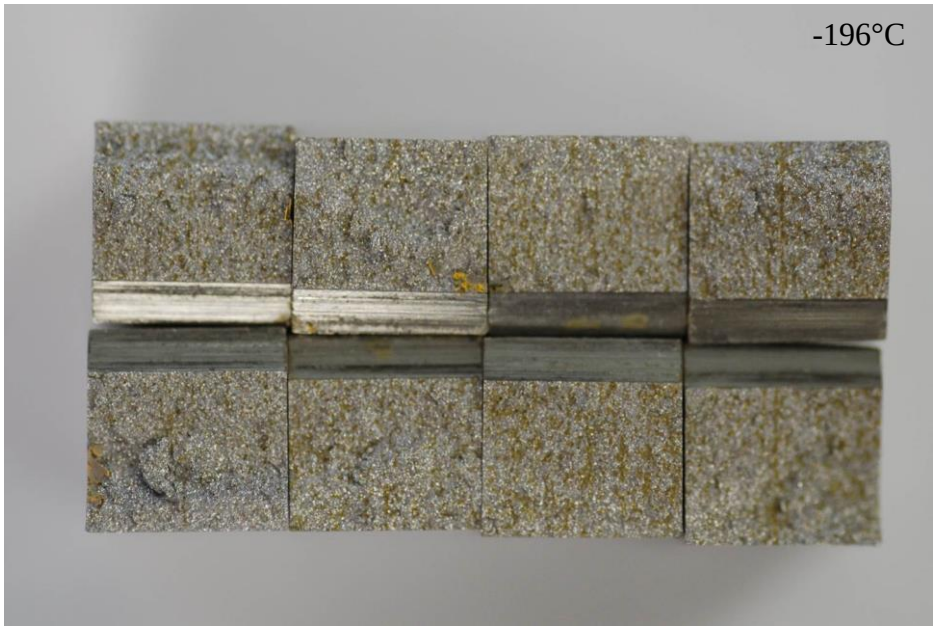


Figura 113 - Faces de fratura dos corpos de prova retirados da placa de material com 8,6% de deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy à temperatura de -196°C.

Fonte: Autora

As Figuras 114, 115 e 116 mostram os gráficos de expansão lateral em função da temperatura, a curva ajustada pelo método da Tangente Hiperbólica e suas equações correspondentes. Os dados obtidos com o projetor de perfis utilizados para a construção do

gráfico de expansão lateral em função da temperatura encontram-se nas Tabelas 6, 7 e 8 do Anexo A.

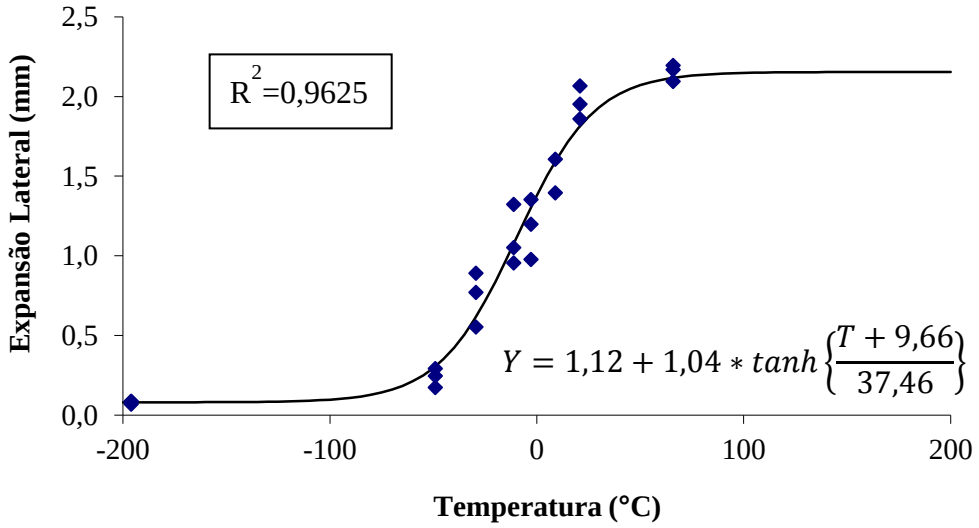


Figura 114 - Gráfico da expansão lateral em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material sem deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

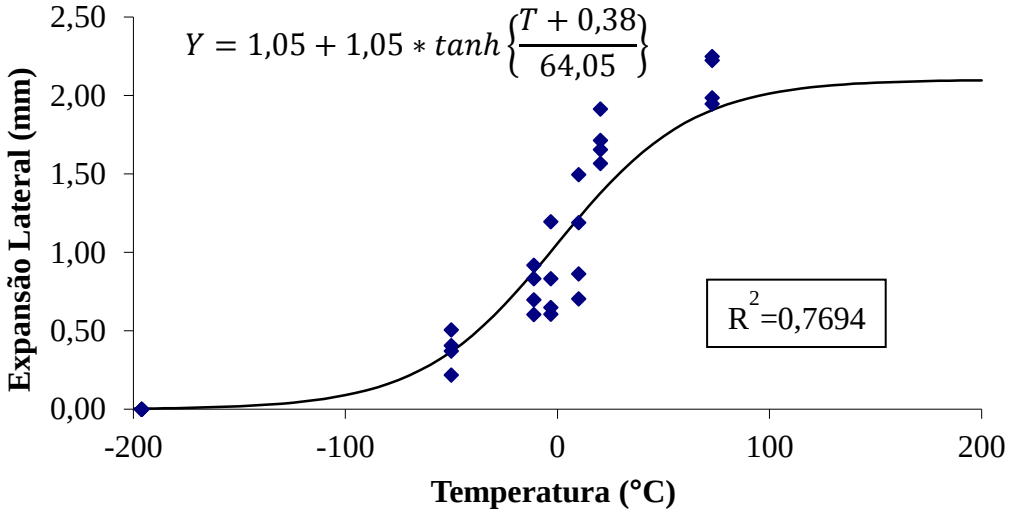


Figura 115 - Gráfico da expansão lateral em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 4,5%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

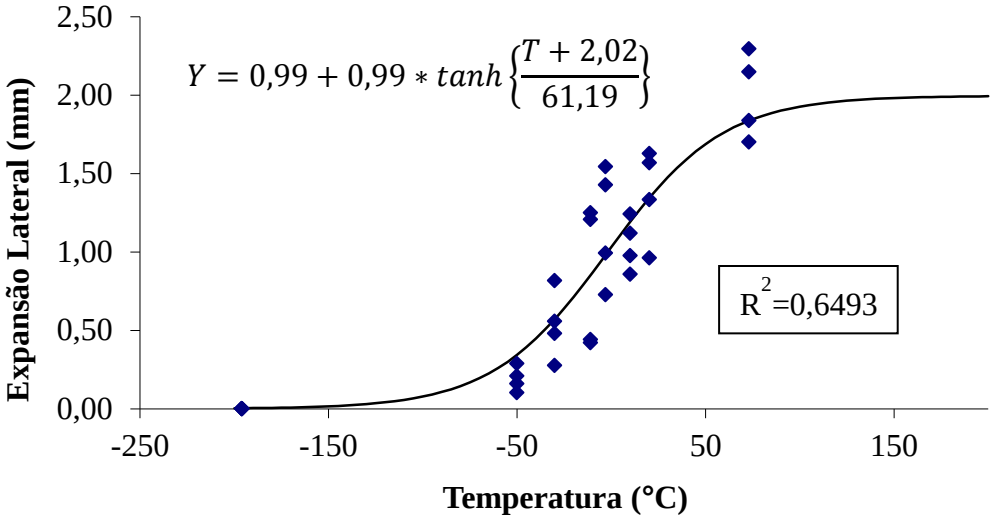


Figura 116 - Gráfico da expansão lateral em função da temperatura dos corpos prova retirados da placa de material com deformação prévia de 8,6%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

Um resumo dos valores de TTDF-mEL obtidos a partir destes gráficos encontra-se na Tabela 19. Os valores de TTDF-mEn são trazidos novamente nesta tabela, para facilitar a comparação dos valores.

Tabela 19 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, utilizando os dados de expansão lateral em função da temperatura.

Pré-deformação	0%	4,5%	8,6%
TTDF-mEL	-9,7	-0,4	-2,0
TTDF-mEn	-2	3	14

Fonte: Autora

Avaliando os valores de TTDF-mEL, observa-se que não há alteração gradativa da TTDF-mEL com o aumento da deformação do material, o que traria um retrato do comportamento do material. Cabe ainda comentar a grande diferença entre os valores de TTDF-mEL e TTDF-mEn, uma vez que o esperado seria que ambas as avaliações representassem valores similares, por tratarem da média entre os patamares, e por ser esperado que a expansão lateral do material seja proporcional à energia absorvida por ele. Isto

provavelmente ocorre, pois os valores máximos de coeficiente de correlação obtidos para os gráficos das medidas de expansão lateral apresentam-se menores que aqueles obtidos para os gráficos de medidas de energia absorvida.

A Figura 117 mostra a sobreposição das curvas de ajuste obtidas para os dados de expansão lateral em função da temperatura do material nas 3 condições, facilitando a avaliação da diferença no comportamento do material quanto maior é sua pré-deformação, e também são apresentadas as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados à temperatura dos patamares superior e inferior e também a uma temperatura próxima à TTDF.

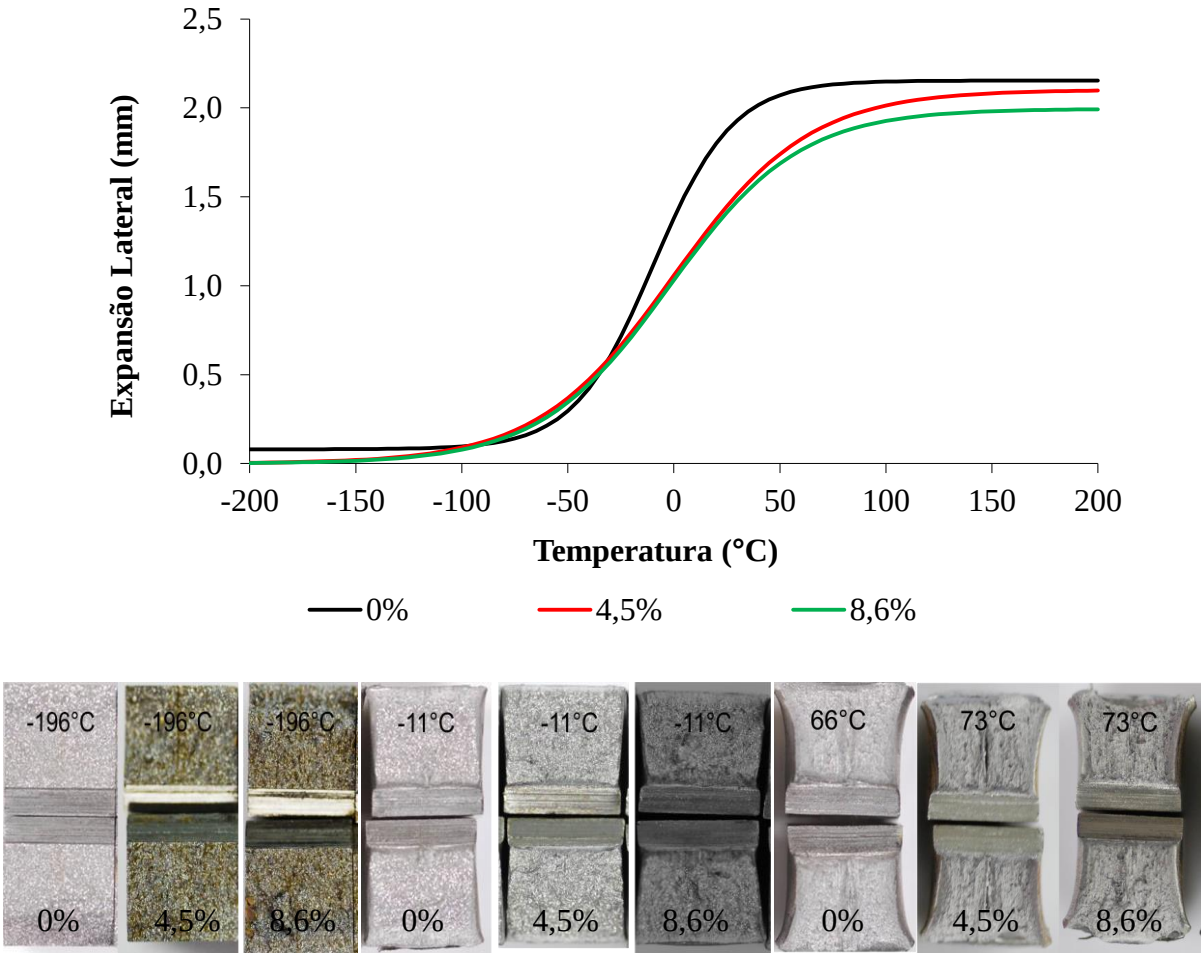


Figura 117 - Gráfico da sobreposição das curvas de expansão lateral em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de deformação, e as faces de fratura de corpos de prova ensaiados às temperaturas dos patamares superior e inferior e também próxima à TTDF.

Fonte: Autora

É possível verificar que os materiais ensaiados com pré-deformação de 4,5% e 8,6% tem comportamento muito similar, tanto quanto à maior expansão lateral dos corpos de prova quanto na região de transição, enquanto que o material sem pré-deformação apresenta uma região de transição mais abrupta que os demais. A partir da avaliação das faces de fratura, fica claro que apenas com a visualização das faces de fratura não permite definir a diferença de comportamento do material quanto maior é sua pré-deformação, uma vez que a aparência das faces de fratura são muito semelhantes quando avaliadas macroscopicamente.

4.3.3 Análise da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo)

As faces de fratura dos corpos de prova nas 3 condições de deformação ensaiados ao impacto foram avaliadas e comparadas com a Figura 27, oriunda da norma ASTM E23 (2012), de forma a determinar por avaliação visual, a porcentagem de fratura dúctil do material, nas diversas temperaturas de ensaio, para determinação da TTDF-50/50. Na Figura 118 é mostrado um exemplo de como essa avaliação foi realizada, ilustrando a região brilhante do corpo de prova, que foi considerada uma indicação de fratura frágil por clivagem.

Figura 118 – Exemplo de realização da avaliação da porcentagem de fratura dúctil qualitativa, feita pela comparação da face de fratura com a referência da norma ASTM E23 (2012).

Fonte: Autora

As Figuras 119, 120 e 121 trazem os dados de porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura, e também as respectivas curvas obtidas pelo ajuste dos dados pelo método da Tangente Hiperbólica com suas equações. O fato de haver a indicação ´qualitativo´ neste caso ocorre pelo fato de que estes dados foram obtidos pela observação e comparação das faces de fratura dos corpos de prova com a Figura 27, e não a partir de dados numéricos. Os dados originais utilizados para a construção desses gráficos encontram-se na Tabela 2 do Anexo A.

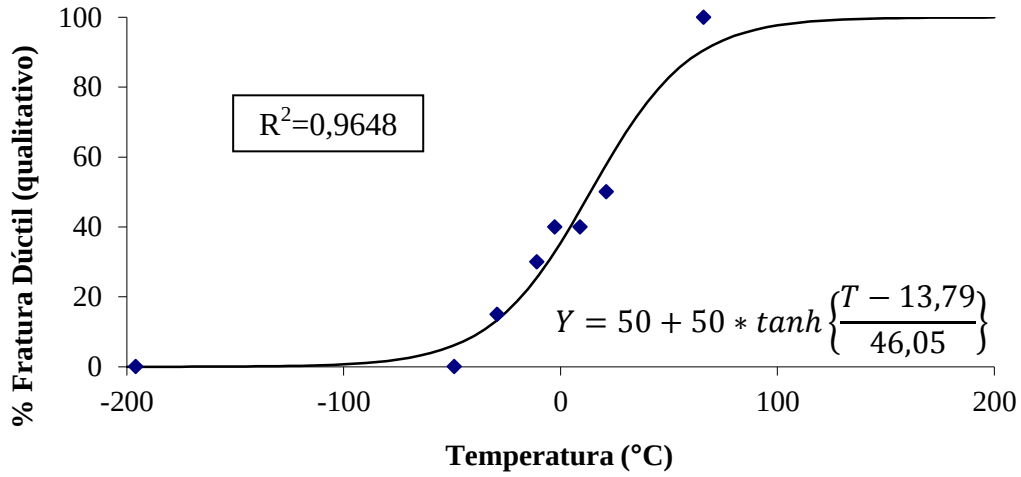


Figura 119 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material sem deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

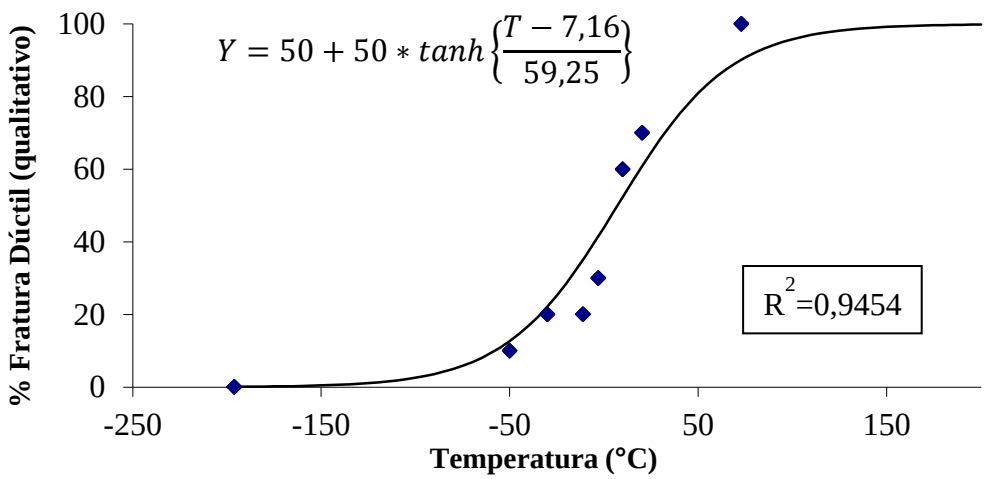


Figura 120 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 4,5%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

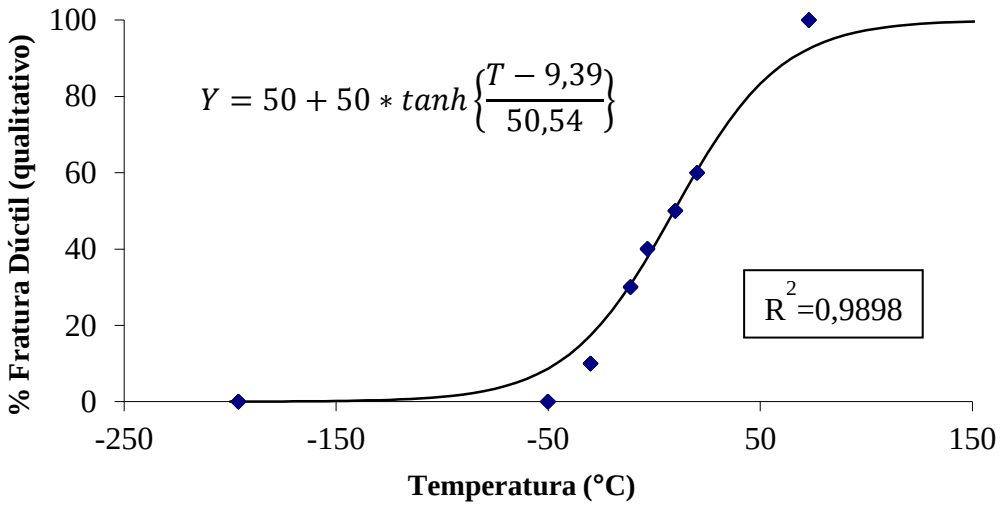


Figura 121 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 8,6%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

A Figura 122 mostra a sobreposição das curvas de ajuste obtidas para os dados de porcentagem de fratura dúctil em função da temperatura do material nas 3 condições, possibilitando a avaliação da diferença no comportamento do material quanto maior é sua pré-

deformação. É possível verificar que o comportamento dos materiais é muito similar, não importando o valor da pré-deformação aplicada ao material antes do ensaio de impacto, quando se avalia apenas visualmente as faces de fratura dos corpos de prova depois de ensaiados.

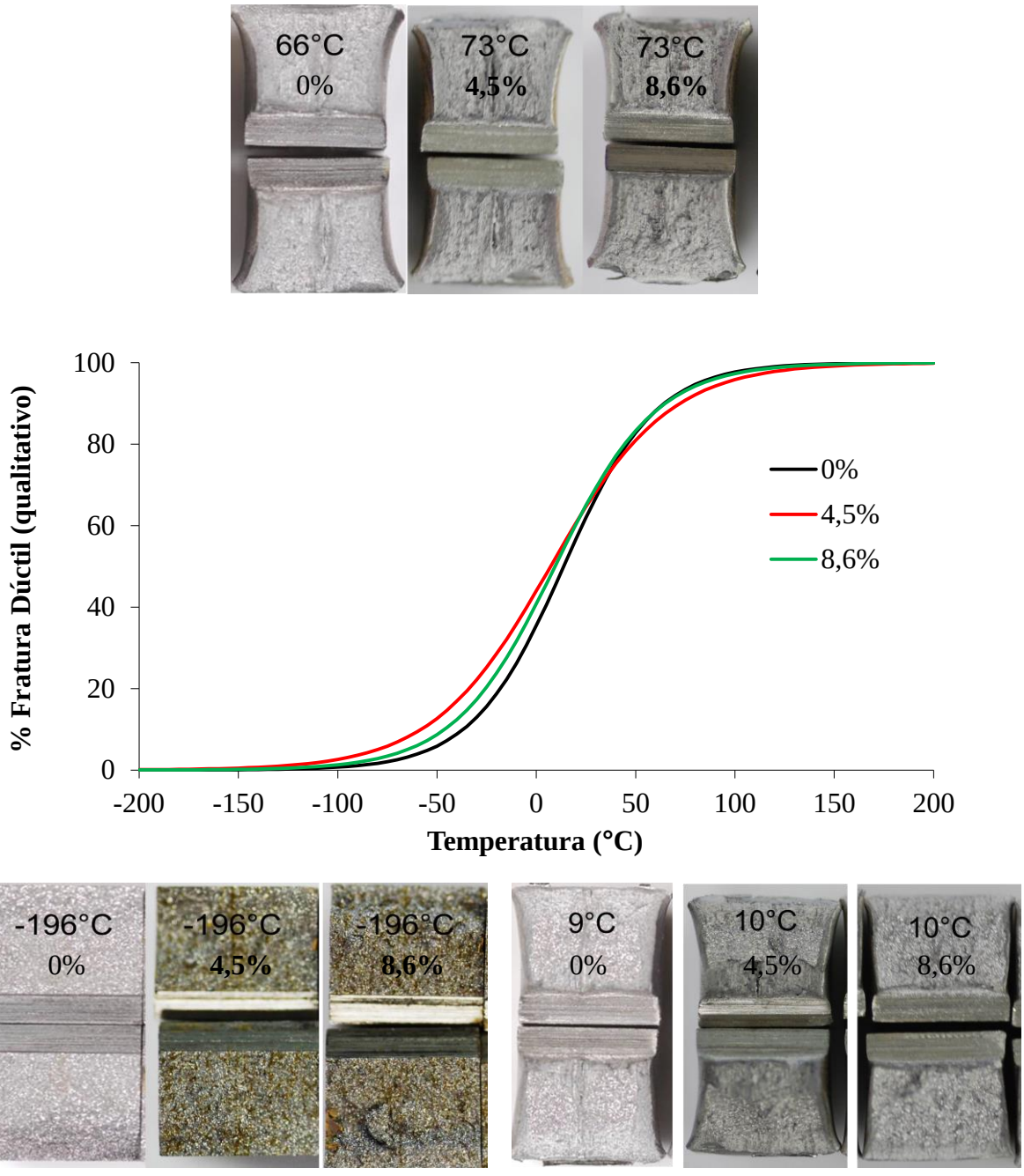


Figura 122 - Gráfico da sobreposição das curvas de porcentagem de fratura dúctil (qualitativo) em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de deformação.

Fonte: Autora

A Figura 122 também traz as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto a temperaturas dos patamares superior, inferior e próxima à TTDF. A partir delas, fica fácil verificar que as faces de fratura são muito similares quando o ensaio é realizado à mesma temperatura, mesmo quando são variados os níveis de pré-deformação.

Além dos valores de TTDF-50/50, foi possível também determinar os valores de TTDF-TFN e TTDF TDN pela extrapolação dos gráficos mostrados acima, conforme descrito na Figura 38. Por estes resultados, é possível verificar que nenhum dos valores obtidos por esta avaliação refletem de modo esperado o comportamento do material, uma vez que nenhum deles varia diretamente com a pré-deformação do material. Um resumo dos resultados obtidos a partir das avaliações de porcentagem de fratura dúctil qualitativo em função da temperatura é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, pelo critério da porcentagem de fratura dúctil qualitativo.

		Pré-deformação		
		0%	4,5%	8,6%
TTDF-50/50	Qualitativo	14	7	9
TTDF-TDN		-31	-58	-42
TTDF-TFN		60	76	60

Fonte: Autora

4.3.4 Análise da porcentagem de fratura dúctil (quantitativo)

A área de fratura por clivagem foi obtida através da medição da região de “Fratura Plana” (área brilhante) da face de fratura dos corpos de prova, conforme Figura 29, e posterior análise dos valores com a tabela de referência da norma ASTM E23 (2012), apresentada anteriormente nas Tabelas 6 e 7. Na Figura 123 é mostrado um exemplo de como essa avaliação foi realizada, ilustrando a região brilhante do corpo de prova, que foi considerada uma indicação de fratura frágil por clivagem.

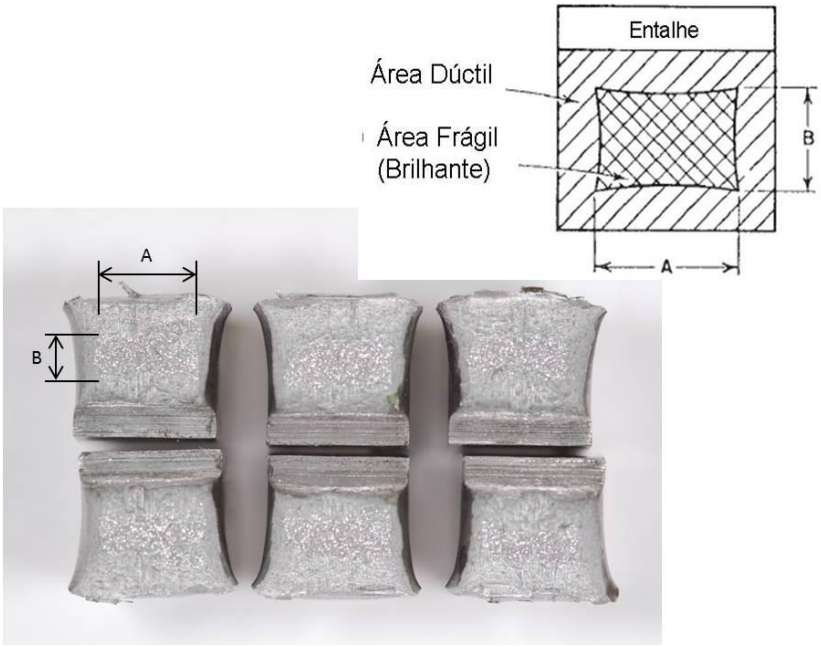


Figura 123 - Exemplo de realização da avaliação da porcentagem de fratura dúctil quantitativa, feita pela medição da área de fratura plana utilizando como referência a figura da norma ASTM E23 (2012).
Fonte: Autora

Os dados referentes à área de fratura dúctil foram utilizados para a confecção dos gráficos apresentados nas Figuras 124, 125 e 126. Assim como nos gráficos anteriores, as curvas ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica e suas equações correspondentes também são mostradas. Os dados originais utilizados para confecção desses gráficos encontram-se nas Tabelas 3, 4 e 5 do Anexo A.

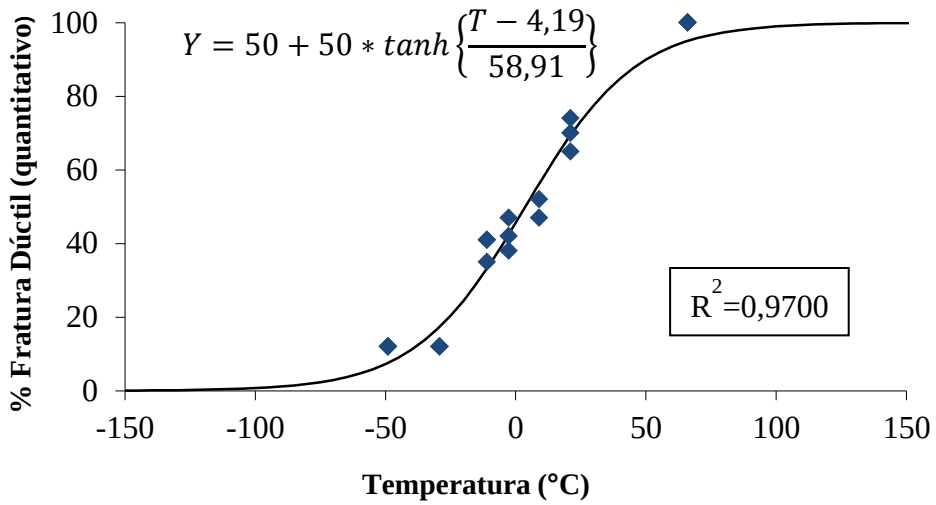


Figura 124 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (obtida a partir da área de fratura plana ou por clivagem) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material sem deformação prévia, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

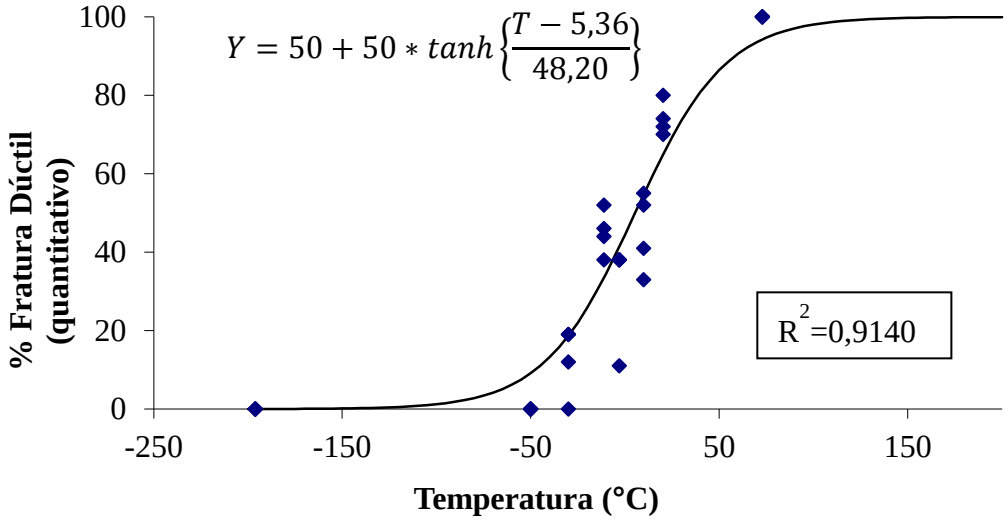


Figura 125 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (obtida a partir da área de fratura plana ou por clivagem) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 4,5%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

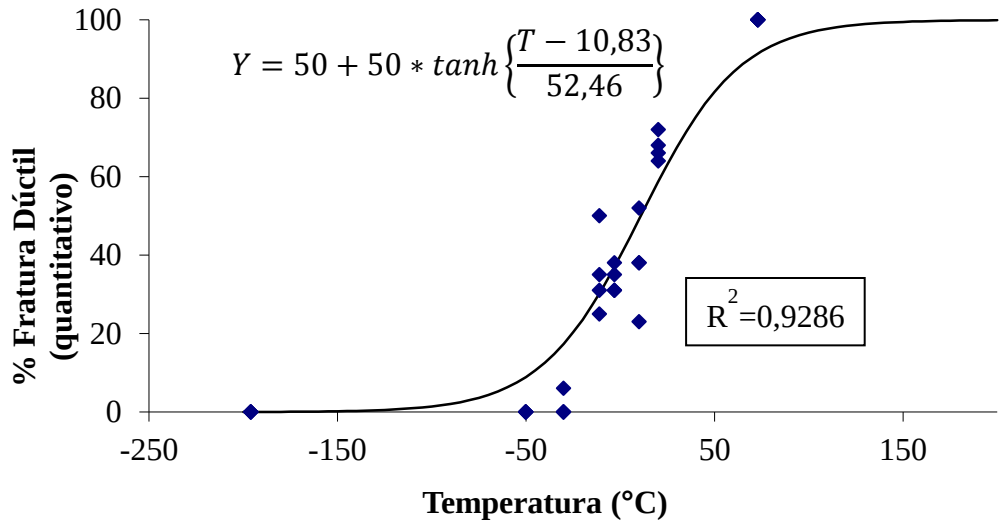


Figura 126 - Gráfico da porcentagem de fratura dúctil (obtida a partir da área de fratura plana ou por clivagem) em função da temperatura dos corpos de prova retirados da placa de material com deformação prévia de 8,6%, ensaiados ao impacto Charpy ajustado pelo método da Tangente Hiperbólica.

Fonte: Autora

A Figura 127 mostra a sobreposição das curvas de ajuste obtidas para os dados de porcentagem de fratura dúctil (quantitativo) em função da temperatura do material nas 3 condições de pré-deformação, e também as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados a temperaturas dos patamares superior e inferior, assim como a uma temperatura próxima à TTDF. Novamente, é possível verificar que o comportamento dos materiais é muito similar, não importando o valor da pré-deformação aplicada ao material antes do ensaio de impacto, e que apenas pela avaliação visual as faces de fratura fica muito difícil definir uma diferença significativa entre as faces de fratura obtidas para ensaios à mesma temperatura.

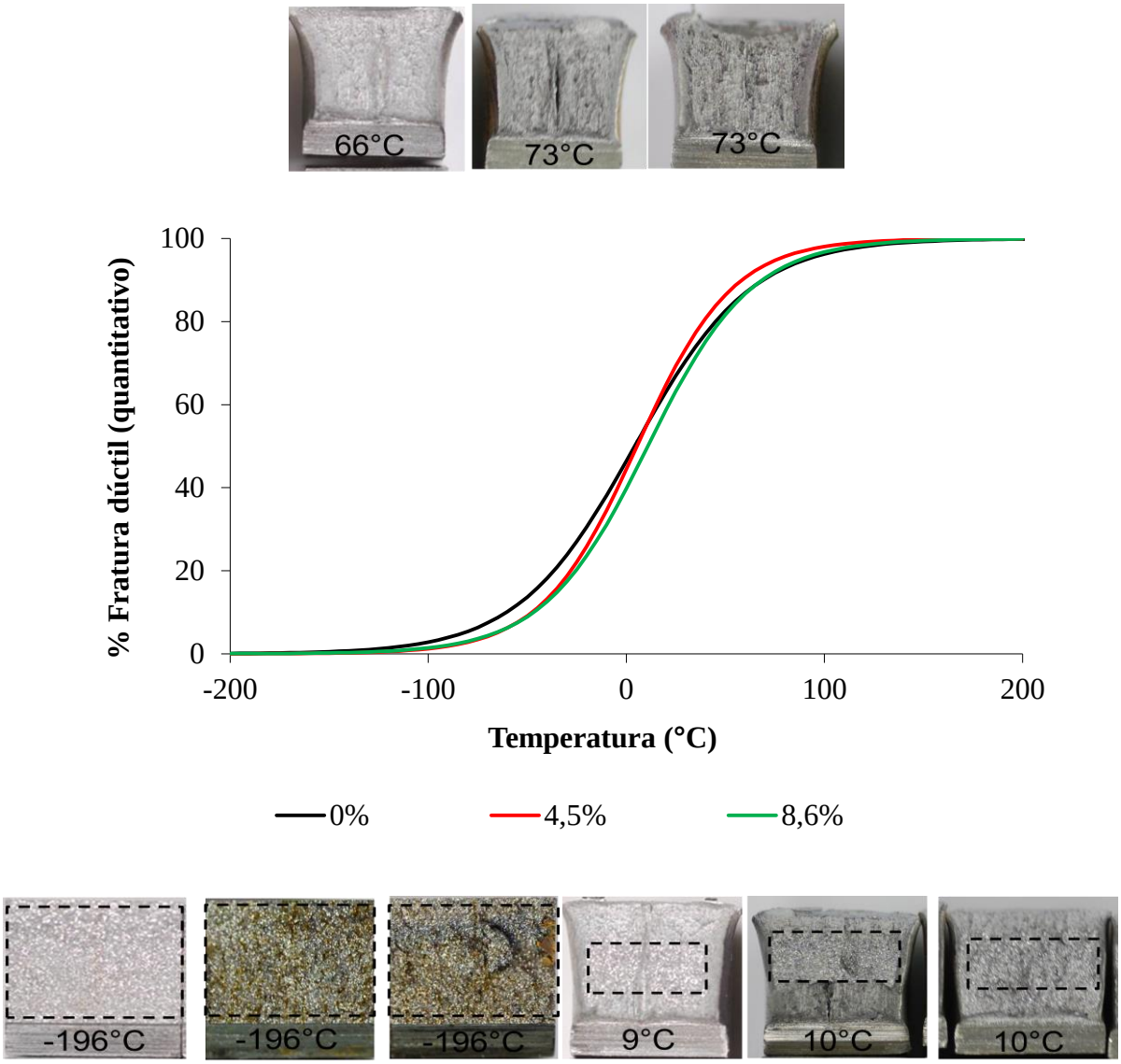


Figura 127 - Gráfico da sobreposição das curvas de porcentagem de fratura dúctil (quantitativo) em função da temperatura ajustadas pelo método da Tangente Hiperbólica dos corpos de prova ensaiado nas 3 condições de deformação.

Fonte: Autora

Além dos valores de TTDF-50/50, foi possível também determinar os valores de TTDF-TFN e TTDF TDN pela extrapolação dos gráficos mostrados acima, conforme descrito na Figura 38. Um resumo dos valores de TTDF encontrados por este critério de avaliação encontra-se na Tabela 21.

Tabela 21 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, pelo critério da porcentagem de fratura dúctil quantitativo.

		Pré-deformação		
		0%	4,5%	8,6%
TTDF-TFN	Quantitativo	45	55	70
TTDF-TDN		-25	-48	-50
TTDF-50/50		5	5	11

Fonte: Autora

Os valores de TTDF-TFN obtidos aumentam de acordo com a pré-deformação do material, enquanto que os valores de TTDF-TDN diminuem com o aumento da pré-deformação do material, mostrando que a utilização deste critério traz informações quanto ao comportamento do material, indicando um alargamento da região de transição com o aumento da pré-deformação. Já os valores de TTDF-50/50 para o material sem deformação e para o material com 4,5% de pré-deformação são os mesmos, havendo diferença apenas para o material com 8,6% de pré-deformação, e portanto esses resultados pouco diferenciam as 3 condições de pré-deformação estudadas.

4.4 Comparativo entre as TTDFs obtidas

A Tabela 22 apresenta todos os valores de TTDF obtidos pelos diferentes critérios, nas 3 condições de deformação do material.

Tabela 22 – Valores de TTDF (em °C) obtidos para cada condição do material, pelos diferentes critérios de avaliação.

Critério		Pré-deformação		
		0%	4,5%	8,6%
Energia absorvida	TTDF-20J	-38	-50	-18
	TTDF-mEn	-2	3	14
	TTDF-TFN	35	68	82
	TTDF-TDN	-40	-60	-58
Expansão lateral	TTDF-mEL	-9,7	-0,4	-2,0
Porcentagem de fratura dúctil qualitativo	TTDF-50/50	14	7	9
	TTDF-TDN	-31	-58	-42
	TTDF-TFN	60	76	60
Porcentagem de fratura dúctil quantitativo	TTDF-50/50	4	5	11
	TTDF-TDN	-25	-48	-50
	TTDF-TFN	45	55	70

Fonte: Autora

Verifica-se que os valores obtidos quando se adota cada uma das diferentes definições para determinação da TTDF são diferentes entre si. O valor da TTDF-TFN é o maior deles, sendo portanto o mais conservador de todos, pois considera que a temperatura de transição é aquela na qual ainda não existe fratura por clivagem. Além disso, observa-se que os valores de TTDF-TFN obtidos pelo critério de absorção de energia e pela porcentagem de fratura dúctil quantitativo aumentam quanto maior é a pré-deformação do material, mostrando uma tendência do comportamento do material, enquanto o mesmo não acontece pelo critério de fratura dúctil qualitativo.

Os valores de TTDF-50/50 obtidos pelos critérios de porcentagem de fratura dúctil qualitativo e quantitativo, apesar de ambos serem resultados da avaliação das faces de fratura dos corpos de prova, também não são os mesmos. Além disso, nenhum deles varia juntamente com a variação da pré-deformação do material.

Quando os valores de TTDF-50/50 qualitativo e quantitativo são comparados também com os valores de TTDF-mEn e TTDF-mEL, observa-se uma diferença ainda maior entre os

resultados, embora eles possam ser comparados pois todos referem-se a valores obtidos para média dos patamares, apesar de serem obtidos por critérios diferentes.

Para aprofundar o estudo do micromecanismo de fratura, foram realizadas análises das faces de fratura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Esta verificação teve por objetivo confirmar o micromecanismo de fratura observado visualmente nas faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy nas diferentes temperaturas.

A Figura 128 traz a avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado a 66°C, que supostamente apresentaria fratura 100% dúctil, o que foi confirmado pela análise de Microscopia Eletrônica de Varredura.

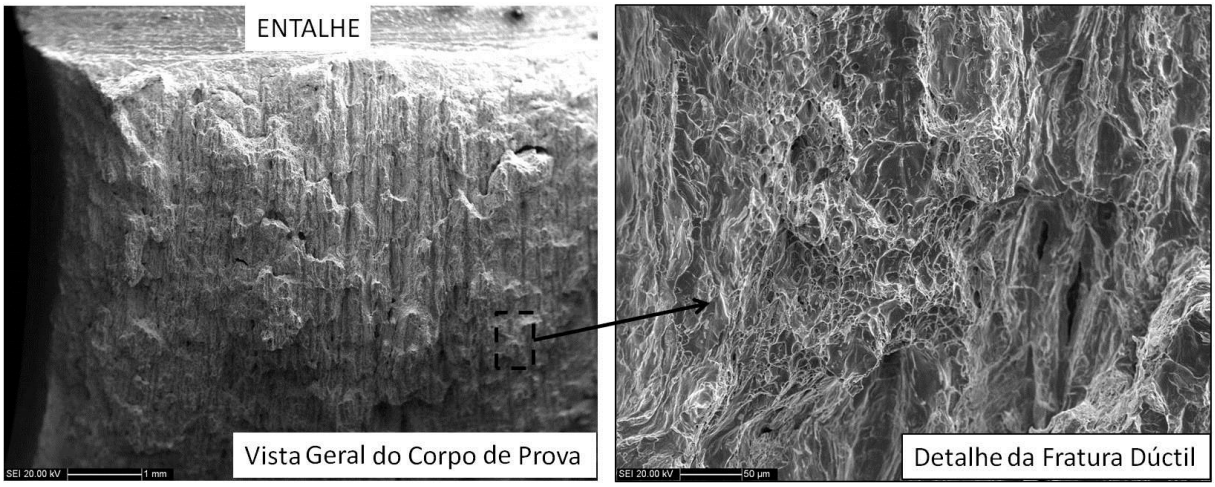


Figura 128 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a 66°C por técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autora

Da mesma forma, um corpo de prova ensaiado a -196°C foi avaliado por técnica de microscopia eletrônica de varredura. Neste caso, visualmente a fratura apresenta-se totalmente brilhante, e esperava-se que uma fratura exclusivamente resultante do micromecanismo de fratura por clivagem fosse observada, o que realmente ocorreu e pode ser confirmado na Figura 129.

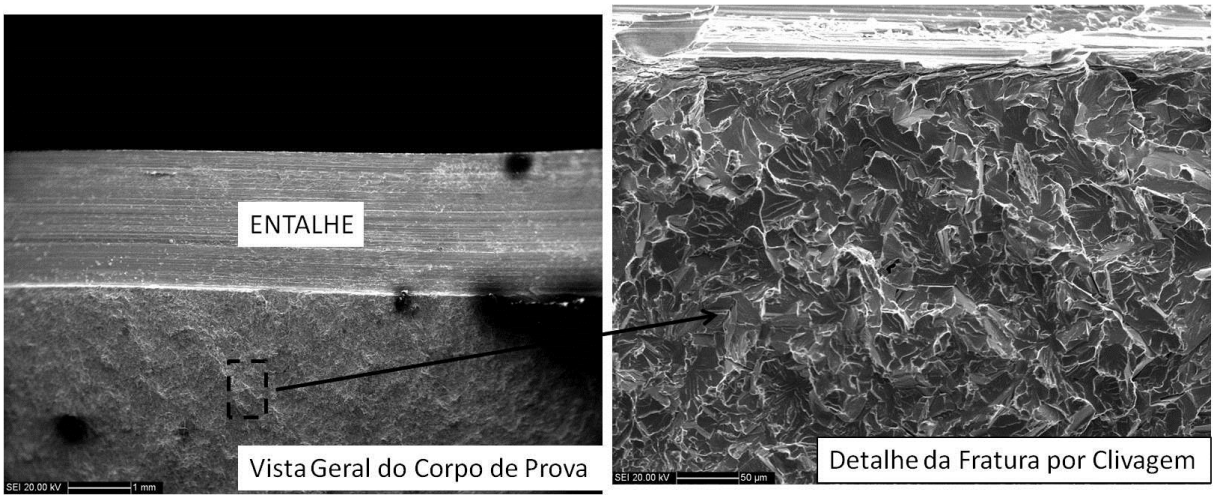


Figura 129 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -196°C por técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autora

Os corpos de prova ensaiados a -2°C são a parte do material sem pré-deformação ensaiada a temperatura mais próxima das TTDF-mEn e TTDF-mEL, e cujas faces de fratura obtida pelo ensaio de impacto foram consideradas como apresentando 50% de fratura frágil e 50% de fratura dúctil, o que condiz com o comportamento que se espera do material na temperatura de transição. Diante dessas considerações, se torna interessante avaliar com mais atenção o micromecanismo de fratura destes corpos de prova. Para isso, tais faces de fratura foram avaliadas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, conforme mostrado na Figura 130, que mostra em detalhe cada porção distinta da face de fratura, ou seja, onde visualmente se considerou que há fratura por clivagem, com aspecto brilhante, e fratura dúctil, que apresenta deformação plástica.

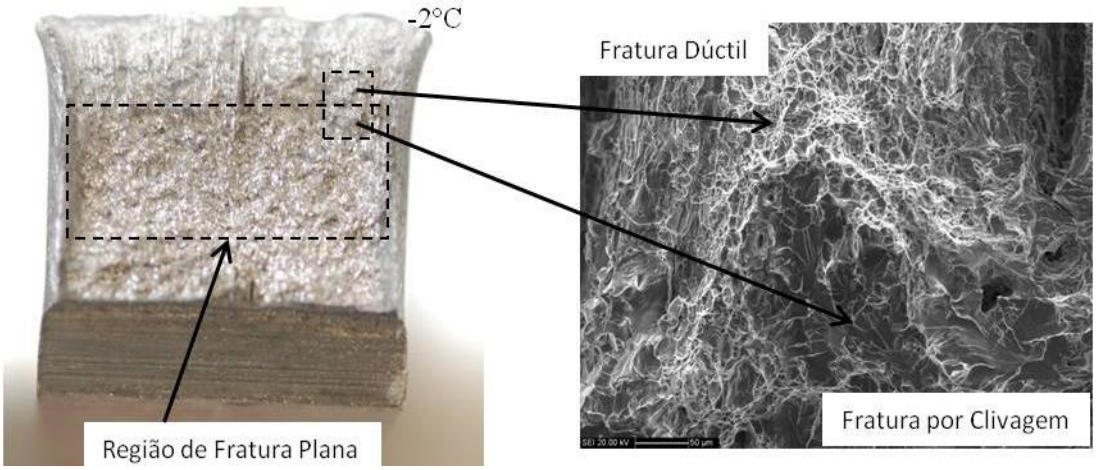


Figura 130 – Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -2°C por técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autora

Apesar da confirmação do micromecanismo de fratura dúctil nas regiões das faces de fratura dos corpos de prova onde a deformação plástica do material podia ser visualmente determinada, e do micromecanismo de fratura por clivagem a menores temperaturas, a avaliação mostra que a verificação visual não representa com exatidão o micromecanismo pelo qual a fratura realmente ocorreu nas regiões de fratura brilhante, que deveriam apresentar exclusivamente o micromecanismo de fratura por clivagem. Quando foram avaliados corpos de prova ensaiados a temperaturas dentro da região de transição, foi possível verificar regiões de deformação plástica dentro da região de fratura plana (ou por clivagem). Na Figura 131 há duas regiões indicadas por setas. A seta contínua indica uma região de fratura dúctil, onde se pode visualizar os alvéolos típicos de fratura que ocorre por este micromecanismo. Já a seta tracejada, indica uma região de fratura por clivagem. As Figuras 132 a 135 também trazem evidências disso nos corpos de prova ensaiados ao impacto nas diversas temperaturas.

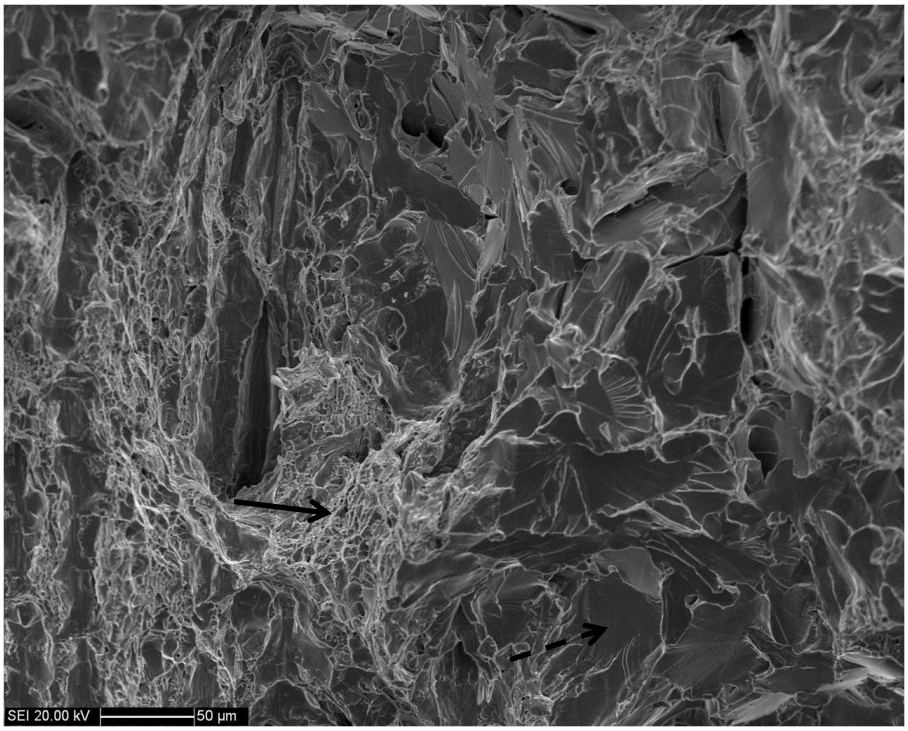


Figura 131 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a 21°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. A seta contínua indica uma região de fratura dúctil, enquanto a seta tracejada indica uma região de fratura por clivagem.

Fonte: Autora

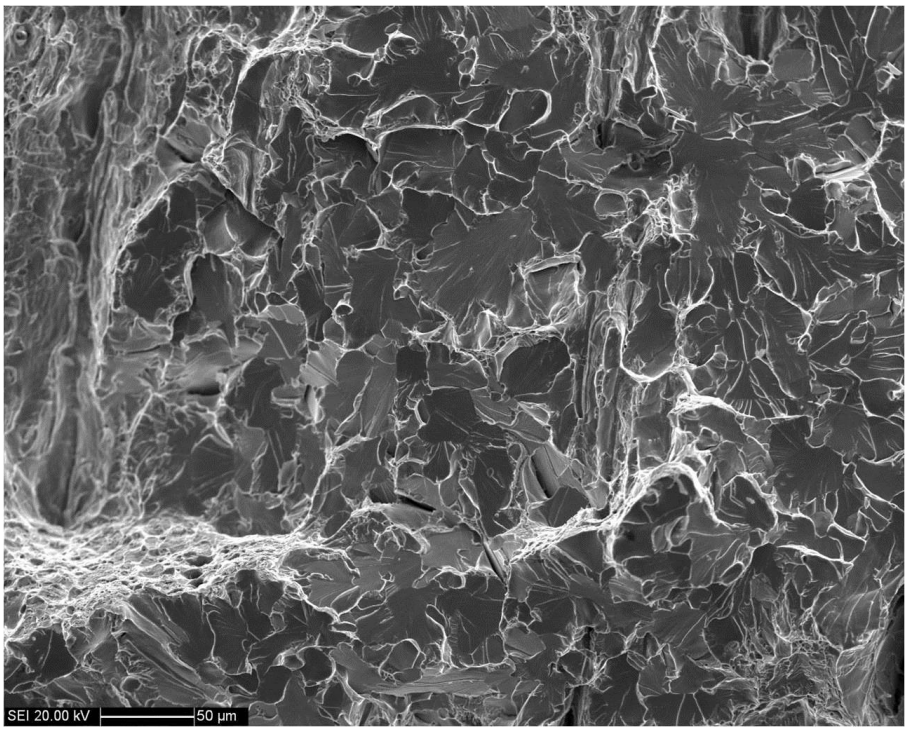


Figura 132 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a 9°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autora

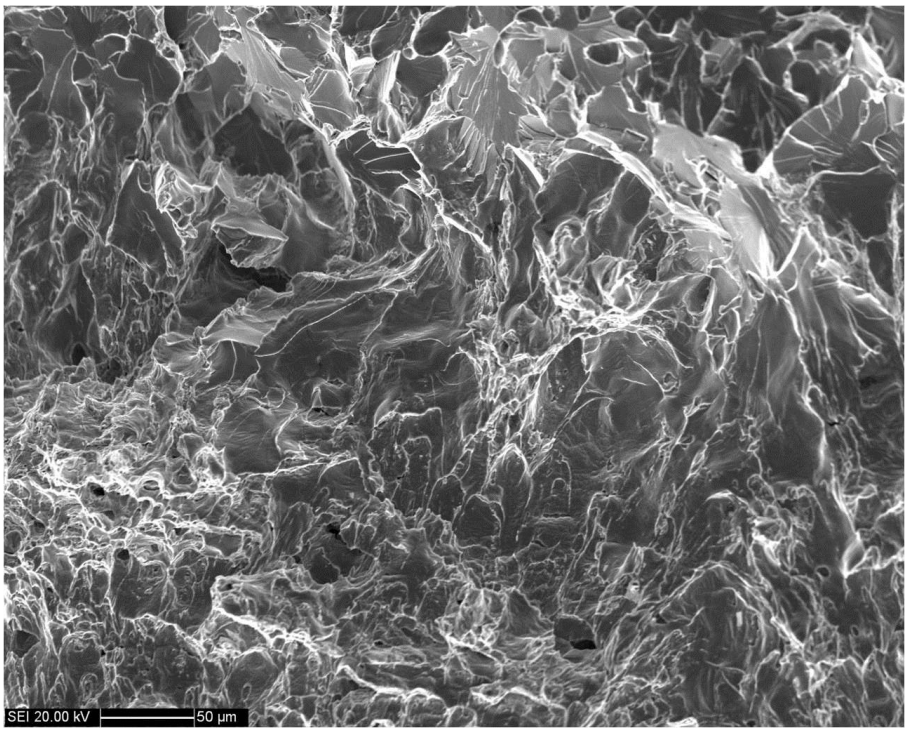


Figura 133 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -11°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autora

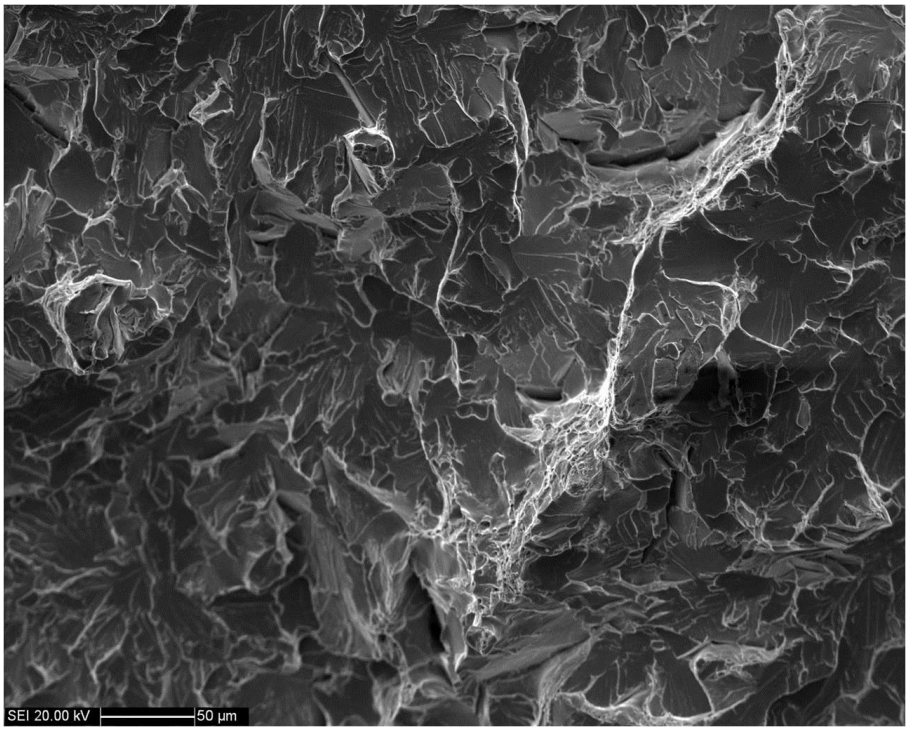


Figura 134 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -29°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autora

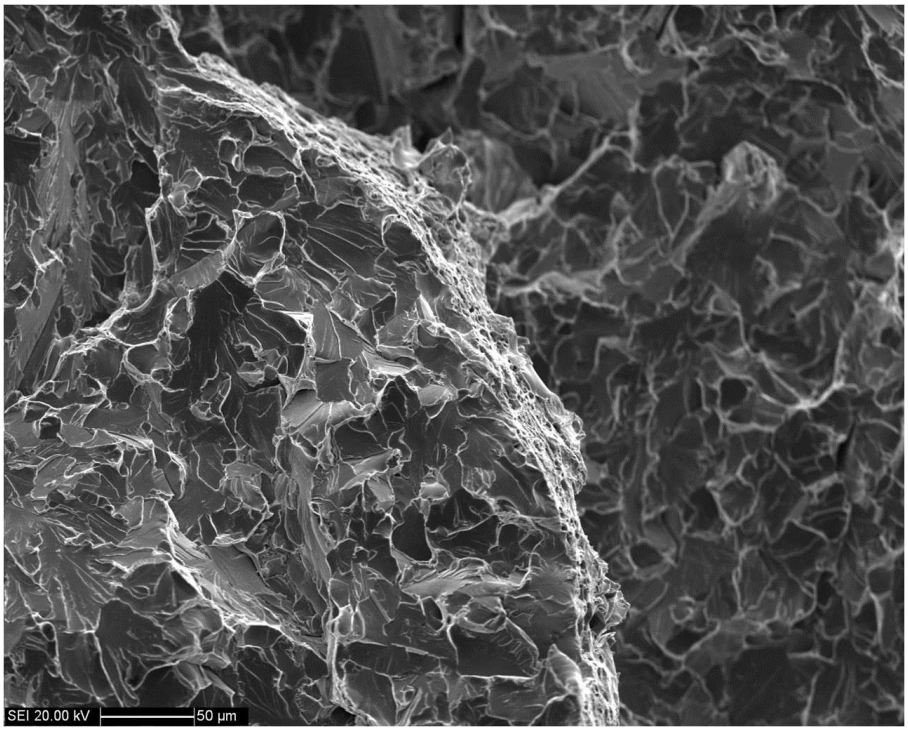


Figura 135 - Avaliação da face de fratura de um corpo de prova ensaiado ao impacto a -49°C analisada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Autora

Diante dessas análises, pode-se confirmar, portanto, que a avaliação visual não traz resultados precisos quanto ao comportamento do material ao impacto, e com isso entende-se porque o valor de TTDF-50/50 qualitativo ou quantitativo difere tanto dos dados de TTDF-mEn e TTDF-EL.

Voltando à discussão dos resultados gerais, há uma estranheza quanto aos valores de TTDF-TDN e TTDF-20J obtidos para o material sem pré-deformação. Assim como comentado no exemplo de Tanguy et al. (2007) apresentado na revisão da literatura, o valor da TTDF-TDN (qualitativo ou quantitativo) não deveria ser maior que o valor da TTDF-20J, já que o material absorve mais energia quanto maior for a temperatura de ensaio. Vê-se que este resultado não faz sentido, pois quando o material absorve 20J de energia ele já se encontra em sua região de transição, conforme se pode verificar no gráfico de energia absorvida em função da temperatura, e portanto apresenta deformação plástica. Não é possível, então, dizer que a uma temperatura mais alta ocorreria a condição de ductilidade nula, como seria esperado pela definição de TTDF-TDN. Sabendo que os dados de TTDF-TDN, qualitativo e quantitativo, são bastante subjetivos, pois são obtidos exclusivamente pela observação macroscópica da face de fratura do corpo de prova, conforme já comentado, e o

valor de TTDF-20J é obtido indiretamente a partir dos dados aproximados por uma equação de Tangente Hiperbólica determinada a partir dos dados de energia absorvida no momento do ensaio, fica evidente que a confiabilidade deste valor é superior, sendo portanto o critério mais indicado para utilização entre estes outros. Se compararmos os mesmos valores obtidos para o material com 8,6% de pré-deformação, entretanto, encontramos valores que fazem sentido, pois a TTDF-TDN é menor que a TTDF-20J.

Avaliando os valores de TTDF-TDN obtidos para os critérios de energia e de porcentagem de fratura dúctil qualitativo e quantitativo, observa-se que apenas os valores obtidos por este último critério representam o comportamento do material com relação à sua pré-deformação, pois os valores se alteram juntamente com a mudança no valor da pré-deformação. Além disso, cabe comentar a diferença significativa dentre os valores obtidos, embora todos tenham sido obtidos pela extrapolação das curvas de ajuste pelo método da Tangente Hiperbólica.

Da mesma forma, os valores de TTDF-TFN obtidos para os critérios de energia e de porcentagem de fratura dúctil qualitativo e quantitativo são divergentes, sendo que apenas os valores obtidos para o critério quantitativo apresentam algum indício sobre o comportamento do material.

Cabe comentar por fim, que a avaliação das curvas obtidas com o ajuste dos dados obtidos pelos diferentes critérios estudados, traz informações quanto ao comportamento de transição dos materiais. Avaliando as curvas de energia absorvida em função da temperatura, vê-se que, para os materiais com 4,5% e 8,6% de deformação, a região de transição vai de -40°C a 40°C aproximadamente, enquanto que a região de transição para o material sem pré-deformação apresenta uma região de transição -60°C até 100°C, sendo portanto uma transição bem mais suave. Já pela avaliação dos gráficos de expansão lateral em função da temperatura, a região de transição é mais estreita, ou seja, ocorre num intervalo menor de temperaturas, ocorrendo uma transição mais brusca, principalmente para o material sem deformação, sendo que para os materiais com pré-deformação a transição ocorre no intervalo entre -50°C e 50°C, valores que se aproximam do intervalo de temperaturas da região de transição obtidos pela avaliação de porcentagem de fratura dúctil qualitativa, enquanto que pelo método de avaliação de porcentagem de fratura dúctil quantitativa o intervalo de temperaturas no qual a região de transição ocorre vai de -50°C a 70°C aproximadamente.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, as diferentes definições para a TTDF foram apresentadas e utilizadas para a avaliação do comportamento ao impacto do aço ASTM A36 com diferentes graus de pré-deformação.

Verificou-se que apenas os valores obtidos para TTDF-mEn, TTDF-TFN obtido pelos critérios de energia e de porcentagem de fratura dúctil quantitativo, e TTDF-TDN também obtido por este critério trazem algum indício quanto ao comportamento do material, pois mostram variação contínua com o aumento da pré-deformação do material.

Verificou-se também que os valores de TTDF obtidos por critérios equivalentes, como TTDF-mEn, TTDF-50/50 (tanto pelo critério quantitativo quanto pelo critério qualitativo) e TTDF-mEL, não são similares, mostrando a divergência que ocorre entre os critérios de avaliação visual e os critérios analíticos de avaliação.

Por sua vez, os valores de TTDF-20J e TTDF-TDN apresentam valores que não fazem sentido. Entretanto, esta característica variou entre as diferentes condições de pré-deformação do material. Para todos eles, contudo, o valor da TTDF-TFN é o maior dentre eles, sendo portanto o mais conservador.

Por outro lado, os valores obtidos para a TTDF-50/50 variaram muito em relação às TTDF-mEn e TTDF-EL, quando se esperava que também apresentassem valores próximos, considerando que a porcentagem de fratura dúctil variaria de maneira similar à expansão lateral em função da temperatura de ensaio. Pela avaliação das faces de fratura dos corpos de prova por microscopia eletrônica de varredura, foi possível visualizar que nos corpos de prova ensaiados na zona de transição há regiões onde, por avaliação visual considerou-se que havia fratura por clivagem, mas nestas também há regiões com alvéolos resultantes de deformação plástica do material, típicos de fratura dúctil. Sendo assim, a determinação da TTDF pelo método da porcentagem de fratura dúctil ou por clivagem fica comprometida, pois por ser um método macroscópico, mesmo que visualmente se julgue que uma face de fratura apresenta 50% de fratura por clivagem e 50% de fratura dúctil ou mesmo avalie-se 100% de fratura por clivagem, ficou confirmado que esta avaliação não é completamente verdadeira.

Considerando todos os resultados obtidos e comentados acima, pode-se finalmente afirmar que o valor de TTDF-mEn obtido pelo critério de absorção de energia é o método mais adequado para determinar a TTDF de um material com pré-deformação até 8,6%, por ser de simples execução, consequentemente com pequeno índice de erros intrínsecos do método,

uma vez que os dados são obtidos pela leitura direta dos valores de energia absorvida na escala da máquina de ensaio, e por representar o comportamento do material.

REFERÊNCIAS

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **The science and engineering of materials.** 5th ed. Austrália: Thomson Learning, 2006.

American Society for Testing and Materials – **Standard Specification for Carbon Structural Steel.** Philadelfia, USA, 2012. ASTM A36.

American Society for Testing and Materials – **Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel.** Philadelfia, USA, 2011. ASTM E45.

American Society for Testing and Materials – **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.** Philadelfia, USA, 2012. ASTM E23.

BOUCHET, C. et al. **Prediction of the effects of neutron irradiation on the charpy ductile to brittle transition curve of an A508 pressure vessel steel.** França, 2005.

CALLISTER, William D. **Fundamentals of materials science and engineering:** an introduction. 2nd. ed. New Jersey: John Wiley, 2005.

CHAO, Y. J.; WARD Jr, J. D., SANDS, R. G.; **Charpy impact energy, fracture toughness and ductile-brittle transition temperature of dual-phase 590 steel**. Columbia, 2005.

CHARPY, G. **Essay on the metals impact bend test of notched bars.** França, 1901.

CHARPY, G. Report on impact tests and the work of Committee nº26. In: VI NEW YORKork CONGRESS, 1912, New York.

DAVIM, J. Paulo; MAGALHÃES, A. G. **Ensaios mecânicos e tecnológicos:** inclui exercícios resolvidos e propostos. 2. ed. Porto, Portugal: Publindústria, 2004.

DRUCE, S. G.; GAGE, G.; POPKISS, E.; **Effects of notch geometry on the impact fracture behaviour of a cast duplex stainless steel.** Oxforshire, United Kingdom, 1987.

EIRCKSONKIRK, M.; SHAIKH, A. Insights and observations arising from curve-fitting the Charpy V-Notch and tensile data contained within the United Stats' light water reactor surveillance database. In: **PROCEEDINGS OF PVP2008-61650 ASME 2008 PRESSURE VASSELS AND PIPING DIVISION CONFERENCE. 2008**.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. Ensaio dos materiais. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

HERTZBERG, Richard W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials.** 4th ed. New York ; Chichester: John Wiley, 1996.

HORATH, Larry. **Fundamentals of materials science for technologists:** properties, testing, and laboratory exercises. Englewood Cliffs, N. J: Prentice-Hall, c1995.

JOO. M. S. et al. **Role of delamination and crystallography on anisotropy of charpy toughness in API X80 steel.** Elsevier, 2012.

KAYANO, H. et al. **Charpy impact testing using miniature specimens and its application to the study of irradiation behavior of low-activation ferritic steels.** Ibaraki, Japan, 1991.

LIU, Y. et al. **Dynamic fracture toughness of X70 pipeline steel and its relationship with arrest toughness and CVN.** China, 2002.

MAGNABOSCO, R.; ROSSETO, L. C. Toughness of two HSLA steel sheets. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.** Rio de Janeiro, v. 25 n..2, 22-26, Novembro 1999, São Paulo, Brasil..

MAKHUTOV, N. A.; MOROZOV, E. M.; MATVIENKO, Y.G; **Some historical aspects and the development of the charpy test in Russia.** Moscow, Elsevier Science Ltd. and ESIS, 2002. S.I.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K.;**Mechanical behavior of materials.** New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

MINAMI, F.; IIDA, M.; TAKAHARA, W.; **Mechanics analysis of charpy test results based on the Weibull Stress Criterion.** Departmentof Manufacturing Science, Osaka University, JAPAN, 2002.

MODENESI, P. J.; **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. Dissertação. São Paulo, SENAI-SP, 2001.

MODENEZI, P. M. **Tenacidade do aço UNS S31803 após soldagem.** Dissertação São Bernardo do Campo, 2008.

MODENEZI, P. M. **Tenacidade do aço UNS S31803 após soldagem TIG.** Dissertação. São Bernardo do Campo, 2009.

MOREIRA, H. S.; **Estudo da influência dos Parâmetros de Soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular.** 2008. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PILKEY, W. D.; **Peterson's stress concentration factors.** 2nd ed. New York ; Chichester: John Wiley, c1997.

PLAUT, R. L.; GORNI, A. A.; NAKASHIMA, J. T.; PEREIRA, M. M.; SILVEIRA, J . H. D. **Estudo das propriedades mecânicas do aço API X70 produzido por laminação controlada.** São Paulo, 2009.

RUSSEL, S. B. **Experiments with a new machine for testing materials by impact.** American Society of Civil Engineers, 1898. S.I.

SHIN, S. Y.et al. **Fracture toughness analysis in transition temperature region of API X70 pipeline steels.** Pohang, Korea. Elsevier Science Ltd. and ESIS, 2006.

SILVA, Maurício de Carvalho. **Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80**. Dissertação. São Paulo, 2009.

SILVA, R. V.; **Avaliação da tenacidade à fratura de soldas de alta resistência e baixa liga pelo método da Integral J.** Dissertação. São Carlos, 1998.

SOUZA, Sérgio A. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos:** fundamentos teóricos e práticos. 5ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

Standards Publishing House – **Impact Bending Test Method at Low, Room and High Temperatures** –, Moscow, 1978. GOST 9454.

TANGUY, B. et al. **Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by charpy impact test part I: experimental results.** EvryCedex, França, 2007.

TÓTH, L.; ROSSMANITH, H. P.; SIEWERT, T. A.; **Historical background and development of the charpy test.** Elsevier Science Ltda. and ESIS, 2002.

APÊNDICE A

Tabela A 1 - Tabela de resultados de energia absorvida por cada corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy, em cada condição de pré-deformação do material.

0%		4,5%		8,6%	
Temperatura (°C)	Energia (J)	Temperatura (°C)	Energia (J)	Temperatura (°C)	Energia (J)
66,00	122,63	73,00	122,00	73,00	98,00
66,00	112,82	73,00	104,00	73,00	112,00
66,00	116,74	73,00	120,00	73,00	102,00
21,00	101,04	73,00	110,00	73,00	114,00
21,00	109,87	20,30	86,00	20,30	60,00
21,00	100,06	20,30	80,00	20,30	82,00
9,00	61,80	20,30	94,00	20,30	48,00
9,00	74,56	20,30	80,00	20,30	70,00
-2,70	45,13	10,00	29,00	10,00	42,00
-2,70	62,78	10,00	92,00	10,00	40,00
-2,70	52,97	10,00	39,00	10,00	41,00
-11,00	42,18	10,00	64,00	10,00	47,00
-11,00	51,01	-3,00	56,00	-3,00	66,00
-11,00	58,86	-3,00	32,00	-3,00	64,00
-29,30	40,22	-3,00	37,00	-3,00	48,00
-29,30	21,58	-3,00	40,00	-3,00	27,00
-29,30	30,41	-11,00	53,00	-11,00	14,00
-49,00	9,81	-11,00	44,00	-11,00	25,00
-49,00	12,75	-11,00	32,00	-11,00	58,00
-49,00	11,77	-11,00	32,00	-11,00	60,00
-196,00	3,92	-30,00	46,00	-30,00	10,00
-196,00	4,91	-30,00	42,00	-30,00	12,00
-196,00	3,92	-30,00	19,00	-30,00	20,00
		-30,00	44,00	-30,00	33,00
		-50,00	10,00	-50,00	9,00
		-50,00	8,00	-50,00	13,00
		-50,00	28,00	-50,00	7,00
		-50,00	18,00	-50,00	8,00
		-196,00	4,00	-196,00	5,00
		-196,00	6,00	-196,00	5,00
		-196,00	5,00	-196,00	5,00
		-196,00	4,00	-196,00	6,00

Fonte: Autora

Tabela A 2 – Determinação da porcentagem de fratura dúctil obtida pela avaliação das faces de fratura dos corpos de prova (método qualitativo) ensaiados pelo ensaio de impacto Charpy, nas 3 condições de pré-deformação.

0%		4,5%		8,6%	
Temperatura (°C)	% Fratura Dúctil	Temperatura (°C)	% Fratura Dúctil	Temperatura (°C)	% Fratura Dúctil
66,00	100,00	73,00	100,00	73,00	100,00
21,00	50,00	20,30	70,00	20,30	60,00
9,00	40,00	10,00	60,00	10,00	50,00
-2,70	40,00	-3,00	30,00	-3,00	40,00
-11,00	30,00	-11,00	20,00	-11,00	30,00
-29,30	15,00	-30,00	20,00	-30,00	10,00
-49,00	0,00	-50,00	10,00	-50,00	0,00
-196,00	0,00	-196,00	0,00	-196,00	0,00

Fonte: Autora

Tabela A 3 - Medições das cotas “A” e “B” da região de fratura por clivagem dos corpos de prova ensaiados ao ensaio de impacto Charpy obtidos com material ensaiado sem pré-deformação, para determinação da porcentagem de fratura dúctil, conforme Figura 27.

Temperatura (°C)	Medições (mm)		% Fratura Dúctil
	A	B	
66,00	0,00	0,00	100,00
66,00	0,00	0,00	100,00
66,00	0,00	0,00	100,00
21,00	7,87	2,79	70,00
21,00	7,87	3,30	65,00
21,00	7,37	2,79	74,00
9,00	8,38	4,32	52,00
9,00	8,64	4,83	47,00
-2,70	9,14	5,59	38,00
-2,70	8,89	5,59	42,00
-2,70	8,38	5,08	47,00
-11,00	9,65	5,08	41,00
-11,00	9,65	5,08	41,00
-11,00	9,65	5,59	35,00
-29,30	9,91	7,11	12,00
-29,30	9,91	7,11	12,00
-29,30	9,91	7,11	12,00
-49,00	9,91	7,11	12,00
-49,00	9,91	7,11	12,00
-49,00	9,91	7,11	12,00
-196,00	9,91	7,11	0,00
-196,00	9,91	7,11	0,00
-196,00	9,91	7,11	0,00

Fonte: Autora

Tabela A 4 - Medições das cotas “A” e “B” da região de fratura por clivagem dos corpos de prova ensaiados ao ensaio de impacto Charpy, cujo nível de pré-deformação aplicado foi 4,5%, para determinação da porcentagem de fratura dúctil, conforme Figura 27.

Temperatura (°C)	Medições (mm)		% Fratura Dúctil
	A	B	
73,00	0,00	0,00	100,00
73,00	0,00	0,00	100,00
73,00	0,00	0,00	100,00
73,00	0,00	0,00	100,00
20,30	8,70	2,60	72,00
20,30	7,90	2,40	80,00
20,30	7,10	2,90	74,00
20,30	7,70	3,20	70,00
10,00	9,00	4,00	55,00
10,00	8,50	4,50	52,00
10,00	9,00	5,80	33,00
10,00	9,50	4,80	41,00
-3,00	9,50	7,40	11,00
-3,00	9,00	5,60	38,00
-3,00	8,70	5,60	38,00
-3,00	9,50	5,30	38,00
-11,00	9,00	4,80	44,00
-11,00	9,30	4,50	46,00
-11,00	9,00	5,30	38,00
-11,00	9,50	4,00	52,00
-30,00	10,00	6,60	19,00
-30,00	10,00	7,70	0,00
-30,00	10,00	6,40	19,00
-30,00	10,00	6,90	12,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00

Fonte: Autora

Tabela A 5 - Medições das cotas “A” e “B” da região de fratura por clivagem dos corpos de prova ensaiados ao ensaio de impacto Charpy cujo nível de pré-deformação aplicado foi 8,6%, para determinação da porcentagem de fratura dúctil, conforme Figura 27.

Temperatura (°C)	Medições (mm)		% Fratura Dúctil
	A	B	
73,00	0,00	0,00	100,00
73,00	0,00	0,00	100,00
73,00	0,00	0,00	100,00
73,00	0,00	0,00	100,00
20,30	9,30	2,90	64,00
20,30	9,00	3,20	66,00
20,30	8,50	2,90	68,00
20,30	8,70	2,40	72,00
10,00	9,30	4,00	52,00
10,00	9,00	6,40	23,00
10,00	9,00	5,30	38,00
10,00	9,30	5,30	38,00
-3,00	9,80	5,30	35,00
-3,00	9,00	5,60	31,00
-3,00	9,80	5,60	38,00
-3,00	10,00	5,30	31,00
-11,00	9,30	4,00	50,00
-11,00	9,80	5,60	35,00
-11,00	9,80	5,30	31,00
-11,00	10,00	6,10	25,00
-30,00	10,00	7,40	6,00
-30,00	10,00	7,70	0,00
-30,00	10,00	7,70	0,00
-30,00	10,00	7,70	0,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-50,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00
-196,00	10,00	10,00	0,00

Fonte: Autora

Tabela A 6 - Tabela dos valores de expansão lateral medidos no projetor de perfis dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy, sem pré-deformação.

Temperatura (°C)	A1	A3	MAIOR	A2	A4	MAIOR	SOMA
66,00	1,060	1,063	1,063	1,133	1,041	1,133	2,196
66,00	1,018	1,060	1,060	1,006	1,035	1,035	2,095
66,00	0,985	1,086	1,086	1,084	1,038	1,084	2,170
21,00	0,941	0,913	0,941	0,831	1,011	1,011	1,952
21,00	0,985	1,070	1,070	0,996	0,914	0,996	2,066
21,00	0,956	0,856	0,956	0,904	0,853	0,904	1,860
9,00	0,648	0,600	0,648	0,747	0,651	0,747	1,395
9,00	0,833	0,716	0,833	0,663	0,774	0,774	1,607
-2,70	0,456	0,472	0,472	0,437	0,506	0,506	0,978
-2,70	0,711	0,684	0,711	0,616	0,641	0,641	1,352
-2,70	0,575	0,524	0,575	0,600	0,624	0,624	1,199
-11,00	0,438	0,477	0,477	0,477	0,465	0,477	0,954
-11,00	0,587	0,536	0,587	0,381	0,465	0,465	1,052
-11,00	0,525	0,599	0,599	0,724	0,533	0,724	1,323
-29,30	0,405	0,322	0,405	0,418	0,485	0,485	0,890
-29,30	0,318	0,415	0,415	0,317	0,355	0,355	0,770
-29,30	0,189	0,243	0,243	0,310	0,287	0,310	0,553
-49,00	0,100	0,055	0,100	0,00	0,073	0,073	0,173
-49,00	0,153	0,145	0,153	0,093	0,000	0,093	0,246
-49,00	0,122	0,167	0,167	0,125	0,000	0,000	0,086
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,069	0,069	0,069
-196,00	0,086	0,000	0,086	0,000	0,000	0,000	0,000
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,085	0,085	0,085

Fonte: Autora

Tabela A 7 - Tabela dos valores de expansão lateral medidos no projetor de perfis dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy, tendo sido aplicada 4,5% de pré-deformação.

Temperatura (°C)	A1	A3	MAIOR	A2	A4	MAIOR	SOMA
73,00	0,999	1,069	1,069	0,975	1,179	1,179	2,248
73,00	0,991	0,987	0,991	0,995	0,968	0,995	1,986
73,00	0,913	1,124	1,124	1,100	1,005	1,100	2,224
73,00	0,871	0,936	0,936	0,854	1,010	1,010	1,946
20,30	0,795	0,749	0,795	0,859	0,703	0,859	1,654
20,30	0,812	0,856	0,856	0,710	0,691	0,710	1,566
20,30	0,863	0,946	0,946	0,882	0,967	0,967	1,913
20,30	0,921	0,472	0,921	0,630	0,793	0,793	1,714
10,00	0,348	0,480	0,480	0,211	0,383	0,383	0,863
10,00	0,398	0,419	0,419	0,284	0,183	0,284	0,703
10,00	0,501	0,603	0,603	0,587	0,530	0,587	1,190
10,00	0,676	0,776	0,776	0,719	0,495	0,719	1,495
-3,00	0,311	0,403	0,403	0,430	0,207	0,430	0,833
-3,00	0,335	0,312	0,335	0,313	0,283	0,313	0,648
-3,00	0,464	0,569	0,569	0,552	0,626	0,626	1,195
-3,00	0,256	0,218	0,256	0,188	0,350	0,350	0,606
-11,00	0,356	0,420	0,420	0,413	0,409	0,413	0,833
-11,00	0,293	0,341	0,341	0,263	0,220	0,263	0,604
-11,00	0,288	0,294	0,294	0,404	0,198	0,404	0,698
-11,00	0,436	0,454	0,454	0,463	0,403	0,463	0,917
-30,00	0,545	0,324	0,545	0,331	0,561	0,561	1,106
-30,00	0,163	0,057	0,163	0,090	0,098	0,098	0,261
-30,00	0,564	0,284	0,564	0,463	0,456	0,463	1,027
-30,00	0,447	0,332	0,447	0,441	0,434	0,441	0,888
-50,00	0,110	0,147	0,147	0,051	0,224	0,224	0,371
-50,00	0,248	0,270	0,270	0,166	0,235	0,235	0,505
-50,00	0,129	0,000	0,129	0,000	0,089	0,089	0,218
-50,00	0,148	0,123	0,148	0,065	0,257	0,257	0,405
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autora

Tabela A 8 - Tabela dos valores de expansão lateral medidos no projetor de perfis dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy, tendo sido aplicada 8,5% de pré-deformação.

Temperatura (°C)	A1	A3	MAIOR	A2	A4	MAIOR	SOMA
73,00	1,146	1,067	1,146	0,974	1,149	1,149	2,295
73,00	0,894	0,801	0,894	0,806	0,791	0,806	1,700
73,00	0,802	0,950	0,950	0,887	0,760	0,887	1,837
73,00	1,149	0,866	1,149	0,907	0,998	0,998	2,147
20,30	0,750	0,727	0,750	0,818	0,633	0,818	1,568
20,30	0,533	0,351	0,533	0,429	0,420	0,429	0,962
20,30	0,815	0,537	0,815	0,518	0,811	0,811	1,626
20,30	0,614	0,678	0,678	0,655	0,648	0,655	1,333
10,00	0,428	0,293	0,428	0,429	0,329	0,429	0,857
10,00	0,447	0,651	0,651	0,410	0,590	0,590	1,241
10,00	0,605	0,403	0,605	0,498	0,514	0,514	1,119
10,00	0,446	0,391	0,446	0,480	0,530	0,530	0,976
-3,00	0,253	0,359	0,359	0,367	0,245	0,367	0,726
-3,00	0,447	0,497	0,497	0,494	0,426	0,494	0,991
-3,00	0,726	0,575	0,726	0,701	0,665	0,701	1,427
-3,00	0,728	0,511	0,728	0,495	0,816	0,816	1,544
-11,00	0,188	0,214	0,214	0,226	0,117	0,226	0,44
-11,00	0,670	0,453	0,670	0,579	0,557	0,579	1,249
-11,00	0,225	0,058	0,225	0,186	0,196	0,196	0,421
-11,00	0,603	0,503	0,603	0,578	0,603	0,603	1,206
-30,00	0,244	0,311	0,311	0,246	0,247	0,247	0,558
-30,00	0,283	0,424	0,424	0,392	0,313	0,392	0,816
-30,00	0,106	0,242	0,242	0,238	0,079	0,238	0,48
-30,00	0,136	0,000	0,136	0,0580	0,140	0,140	0,276
-50,00	0,059	0,079	0,079	0,130	0,092	0,130	0,209
-50,00	0,000	0,093	0,093	0,000	0,066	0,066	0,159
-50,00	0,000	0,103	0,103	0,000	0,000	0,000	0,103
-50,00	0,153	0,063	0,153	0,134	0,070	0,134	0,287
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-196,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autora