



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**LINSMAR JACÓ RIBEIRO MACÊDO**

**APLICAÇÃO DO ENSAIO MINIATURIZADO POR  
PENETRAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO API 5DP TOOL  
JOINT**

Salvador

2019

**LINSMAR JACÓ RIBEIRO MACÊDO**

**APLICAÇÃO DO ENSAIO MINIATURIZADO POR  
PENETRAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO API 5DP TOOL  
JOINT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas (PPEE), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas. Área de Concentração: Integridade Estrutural.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Armando Sá Ribeiro – UFBA

Salvador

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Macêdo, Linsmar Jacó Ribeiro

Aplicação do ensaio miniaturizado por penetração  
para determinação de propriedades mecânicas do aço API  
5DP Tool Joint / Linsmar Jacó Ribeiro Macêdo. --  
Salvador, 2019.

140 f. : il

Orientador: Armando Sá Ribeiro Junior.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Estruturas) -- Universidade Federal da  
Bahia, Escola Politécnica, 2019.

1. Small Punch Test. 2. Ensaio Miniaturizado. 3.  
Propriedades Mecânicas. 4. Tenacidade. 5. API 5DP Tool  
Joint. I. Sá Ribeiro Junior, Armando. II. Título.

**LINSMAR JACÓ RIBEIRO MACÊDO**

**APLICAÇÃO DO ENSAIO MINIATURIZADO POR  
PENETRAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO API 5DP TOOL  
JOINT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas (PPEE), Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas. Área de Concentração: Integridade Estrutural.

Salvador, 14 de novembro de 2019.

Banca examinadora,

Armando Sá Ribeiro – Orientador \_\_\_\_\_  
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina.  
Universidade Federal da Bahia.

Geraldo José Belmonte dos Santos \_\_\_\_\_  
Doutor em Modelagem Computacional pelo Laboratório Nacional de Computação Científica – LNCC.  
Universidade Estadual de Feira de Santana.

Maria Doroteia Costa Sobral \_\_\_\_\_  
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas.  
Instituto Federal da Bahia.

Rodrigo Estevam Coelho \_\_\_\_\_  
Doutor em Tecnologia Nuclear e Materiais pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.  
Instituto Federal da Bahia.

A

Leila Neves, minha esposa, e Antônio Lourenço, meu filho, pelo apoio e compreensão dos momentos de ausência nestes primeiros passos da nossa família.

Aos meus pais, Maria e Lourenço e minha irmã, Lismara, pela vida em conjunto, aprendendo e me desenvolvendo até a vida adulta.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Eng. Armando Sá Ribeiro e ao Prof. Dr. Eng. Geraldo José Belmonte dos Santos, pela orientação deste trabalho, troca de experiências e apoio magistral nas atividades acadêmicas.

Ao Senai CIMATEC, através do laboratório de análise metalográfica pelo corte das amostras do ensaio SPT.

Ao DCE pelo apoio institucional nas atividades administrativas durante o curso do Mestrado. A DURIT do Brasil, através do gerente de produção Eng. Murilo, pela confecção do dispositivo de teste, tratamento das peças e medição dos corpos de prova.

Ao IFBA pelo apoio com a caracterização das amostras através do ensaio de tração, microscopia eletrônica de varredura, tratamento e embutimento dos corpos de prova.

A JC LABORATÓRIOS pelo apoio na execução do ensaio de impacto e preparação de corpos de prova.

A PETROBRAS pela doação das peças de teste.

Ao laboratório de estruturas da UEFS pela execução do ensaio de tração e SPT.

Ao CENPES pela execução do ensaio de tomografia computadorizada.

O primeiro consistia em nunca aceitar como verdadeira qualquer coisa sem a conhecer evidentemente como tal; isto é, evitar cuidadosamente a precipitação e a prevenção; não incluir nos meus juízos nada que se não apresentasse tão clara e tão distintamente ao meu espírito que não tivesse nenhuma ocasião para o pôr em dúvida.

Descartes, 1637.

MACÊDO, Linsmar Jacó Ribeiro. Aplicação do ensaio miniaturizado por penetração para determinação de propriedades mecânicas do aço API 5DP Tool Joint. 2019. 140 f. Dissertação – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

## RESUMO

Até a primeira metade da década de 1980 o critério de falha amplamente utilizado para o projeto de estruturas e equipamentos mecânicos era baseada em tensão admissível. Contudo, com a elaboração de projetos cada vez mais complexos, começaram a ocorrer falhas catastróficas em condições de solicitação menores que a tensão admissível, tendo como causa, dentre outras razões, a presença de trincas. Para a avaliação da integridade estrutural desses elementos com descontinuidade é preciso conhecer as propriedades mecânicas do material. Para quantificar esses valores são realizados ensaios padronizados por normas nacionais e internacionais, sendo o padrão do *American Society for Testing and Materials* mundialmente utilizado. Essas normas geralmente requerem amostras com dimensões elevadas o que, em muitos casos, inviabilizam sua execução, seja porque o material disponível está numa quantidade limitada ou porque demandam após sua remoção reparos do componente sob estudo. Alternativamente a esses ensaios convencionais foram desenvolvidos ensaios em amostras com dimensões miniaturizadas que podem chegar a menos de 1% do volume dos ensaios convencionais. Dentre as técnicas desenvolvidas com essa finalidade o *Small Punch Test* vem se consolidando como um método viável para determinação dos parâmetros de fratura e resistência mecânica para materiais metálicos. Neste trabalho foi realizado a avaliação do método SPT, baseado no guia CWA 15627:2007, para caracterização mecânica do aço API 5DP *Tool Joint*. Foi determinada a tensão de escoamento com um erro de -0,1%, a tensão máxima com erro de -0,1%, para a condição engastada de ensaio em corpo de prova sem entalhe, quando comparados com os resultados dos ensaios convencionais.

Palavras-chave: Propriedades Mecânicas, Miniaturização, Tenacidade, API 5DP *Tool Joint*, *Small Punch Test*.



MACÊDO, Linsmar Jacó Ribeiro. Application of Small Puch Test to determination of mechanical properties of API 5DP Tool Joint. 140 f. Master Dissertation – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

### **ABSTRACT**

*Until the first half of the 1980s the failure criterion widely used for the design of mechanical structures and equipment was based on allowable stress. However, with the elaboration of increasingly complex designs, catastrophic failures began to occur under lower stress conditions than the allowable stress, with, among other reasons, the presence of cracks. For the evaluation of the structural integrity of these elements with discontinuity it is necessary to know the mechanical properties of the material. To quantify these values, tests are performed standardized by national and international standards, being the standard of the American Society for Testing and Materials used worldwide. These standards generally require large sample sizes, which in many cases make it impossible to perform, either because the material available is in limited quantity or because they require repairs to the component under study after removal. Alternatively to such conventional tests, tests have been developed on samples with miniaturized dimensions that can reach less than 1% of the volume of conventional tests. Among the techniques developed for this purpose, the Small Punch Test has been consolidated as a viable method to determine fracture parameters and mechanical strength for metallic materials. In this work, the evaluation of the SPT method based on the CWA 15627: 2007 guide for mechanical characterization of the API 5DP Tool Joint steel was performed. The yield stress with an error of -0.1%, the maximum stress with an error of -0.1% for the test body set-up condition. unnotch test when compared with conventional test results.*

*Keywords: Mechanical Properties, Miniaturization, Toughness, API 5DP Tool Joint, Small Punch Test.*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Representação do ensaio de tração.....	23
<b>Figura 2</b> – Dimensões do corpo de prova convencional de tração pela norma ASTM E8.....	25
<b>Figura 3</b> – Representação de um corpo de prova de tração miniaturizado. ....	26
<b>Figura 4</b> – Representação do campo de aplicação da Mecânica da Fratura. ....	27
<b>Figura 5</b> – Modos de carregamento aplicáveis as trincas.....	28
<b>Figura 6</b> – Estado de tensão na frente da trinca. ....	29
<b>Figura 7</b> – Embotamento da ponta de uma trinca. ....	31
<b>Figura 8</b> – Esquema da zona de plastificação na ponta de uma trinca. ....	32
<b>Figura 9</b> – Contorno na região da ponta de uma trinca para determinar a integral J.....	33
<b>Figura 10</b> – Comparação entre materiais com comportamento elastoplástico e não-linear elástico. ....	34
<b>Figura 11</b> – Esquema do ensaio de tenacidade à fratura para os corpos de prova SE(B) e C(T). ....	35
<b>Figura 12</b> – Corpos de prova para ensaio de tenacidade.....	36
<b>Figura 13</b> – Comparação entre as proporções geométricas dos corpos de prova SE(B) – Flexão em três pontos e C(T) Compacto. ....	36
<b>Figura 14</b> – Representação do ensaio de impacto.....	38
<b>Figura 15</b> – Representação da curva de temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) para o ensaio de impacto.....	39
<b>Figura 16</b> – Esquema para identificação das variáveis da função tangente hiperbólica para ajuste dos dados do ensaio de impacto.....	40
<b>Figura 17</b> – Comparação entre as proporções geométricas dos corpos de prova SE(B) – Flexão em três pontos, C(T) – Compacto SPT – Small Punch Test. ....	45
<b>Figura 18</b> – Esquema do ensaio SPT. ....	46
<b>Figura 19</b> – Esquema do dispositivo para o Ensaio MDBT. ....	47
<b>Figura 20</b> – Esquema do dispositivo para o Ensaio SPT Takahashi. ....	48
<b>Figura 21</b> – Dispositivo de teste para ensaio SPT.....	50
<b>Figura 22</b> – Representação da curva carga-deflexão durante o ensaio SPT.....	51
<b>Figura 23</b> – Comportamento do corpo de prova durante o ensaio SPT.....	52
<b>Figura 24</b> – Fluxograma das etapas para determinação da tensão de escoamento através do ensaio SPT. ....	53
<b>Figura 25</b> – Representação das diferentes abordagens para determinação da carga $F_e$ . ....	54
<b>Figura 26</b> – Representação da curva carga-deflexão ajustada após o ensaio SPT. ....	55
<b>Figura 27</b> – Relação entre a carga $F_e$ e a tensão de escoamento.....	57
<b>Figura 28</b> – Fluxograma das etapas para determinação da tensão máxima através do ensaio SPT. ....	58
<b>Figura 29</b> – Relação entre a carga $F_m$ e a tensão máxima. ....	59
<b>Figura 30</b> – Fluxograma das etapas para determinação da tenacidade à fratura através do ensaio SPT. ....	61
<b>Figura 31</b> – Gráfico da relação entre $JIC$ e $\epsilon_f$ . ....	62

<b>Figura 32</b> – Esquema do corte do corpo de prova após ensaio SPT. ....	63
<b>Figura 33</b> – Gráfico da relação entre $h0hf$ e $ufh0$ . Linha contínua $\epsilon f = \beta(ufh0)^2$ , com $\beta = 0,09$ ; Linha tracejada $\epsilon f = \beta ufh0^3$ , com $\beta = 0,15$ . ....	64
<b>Figura 34</b> – Desenho esquemático de um <i>Drill Pipe</i> e suas conexões cônicas <i>Tool Joint Pin</i> (Pino) e <i>Box</i> (Caixa). ....	66
<b>Figura 35</b> – Corte da conexão cônica <i>Tool Joint Pin</i> (Pino). ....	67
<b>Figura 36</b> – Dimensões da conexão cônica <i>Tool Joint Pin</i> (Pino). ....	67
<b>Figura 37</b> – Localização da região de corte dos corpos de prova de tração. ....	69
<b>Figura 38</b> – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração. Unidade milímetros. ....	69
<b>Figura 39</b> – Esquema de execução do ensaio de tração. ....	70
<b>Figura 40</b> – Localização da região de corte dos corpos de prova de Impacto <i>Charpy</i> . ....	71
<b>Figura 41</b> – Dimensões do corpo de prova para ensaio de Impacto <i>Charpy</i> . ....	71
<b>Figura 42</b> – Esquema de execução do ensaio de Impacto <i>Charpy</i> . ....	72
<b>Figura 43</b> – Dimensões do corpo de prova para ensaio SPT. ....	73
<b>Figura 44</b> – Locais de medição da espessura do corpo de prova para ensaio SPT. ....	73
<b>Figura 45</b> – Esquema de execução do ensaio SPT. ....	75
<b>Figura 46</b> – Esquema de execução da tomografia computadorizada das amostras pós ensaio SPT e tratamento de imagem no Fiji ImageJ. ....	76
<b>Figura 47</b> – Direções de avaliação da microestrutura do aço API 5P <i>Tool Joint</i> . ....	80
<b>Figura 48</b> – Microestrutura do aço API 5P <i>Tool Joint</i> . ....	80
<b>Figura 49</b> – Curva tensão vs. deformação de engenharia e real do aço API 5DP <i>Tool Joint</i> . ....	81
<b>Figura 50</b> – Avaliação no MEV da superfície de fratura do corpo de prova de tração T1. ....	83
<b>Figura 51</b> – Avaliação no MEV da superfície de fratura do corpo de prova de tração T3. ....	83
<b>Figura 52</b> – Curva TTDF do aço API 5DP <i>Tool Joint</i> . ....	84
<b>Figura 53</b> – Orientação do corpo de prova e direção do entalhe para barras e cilindros. ....	86
<b>Figura 54</b> – Curva Força vs. Deflexão do aço API 5DP <i>Tool Joint</i> para o ensaio SPT. ....	87
<b>Figura 55</b> – Representação das configurações de penetrador. ....	89
<b>Figura 56</b> – Avaliado da relação entre o parâmetro de escoamento $Feh02$ do ensaio SPT e a tensão de escoamento do material obtido pelo ensaio convencional de tração. ....	94
<b>Figura 57</b> – Avaliação da face de fratura dos corpos de prova do ensaio SPT. ....	98
<b>Figura 58</b> – Avaliado da relação entre o parâmetro de tensão máxima $Feh02$ do ensaio SPT e a tensão máxima do material obtido pelo ensaio convencional de tração. ....	100
<b>Figura 59</b> – Avaliado da relação entre a deformação efetiva de fratura $\epsilon_f$ e a tenacidade à fratura $J_{IC}$ do material. ....	105
<b>Figura 60</b> – Esquema do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627. ....	117
<b>Figura 61</b> – Detalhamento da sede inferior do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627. ....	118
<b>Figura 62</b> – Detalhamento da haste da esfera do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627. ....	119
<b>Figura 63</b> – Detalhamento da sede superior do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627. ....	120

<b>Figura 64</b> – Detalhamento da base do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT. ...	121
<b>Figura 65</b> – Faces da fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto testados a 22,0°C.	122
<b>Figura 66</b> – Avaliação da superfície de fratura das amostras de impacto testados a 22,0°C. .....	125
<b>Figura 67</b> – Avaliação da superfície de fratura das amostras de impacto testados a -86,0°C e - 186,0°C. ....	126
<b>Figura 68</b> – Face de fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto. ....	127
<b>Figura 69</b> – Medição da excentricidade da indentação dos corpos de prova do ensaio SPT. .....	129
<b>Figura 70</b> – Microestrutura da fratura dos corpos de prova SPT Engastados. ....	130
<b>Figura 71</b> – Microestrutura da fratura dos corpos de prova SPT Livre. ....	131
<b>Figura 72</b> – Dispositivo de teste para ensaio SPT. ....	133
<b>Figura 73</b> – Representação da curva carga-deflexão durante o ensaio SPT. ....	137
<b>Figura 74</b> – Representação da curva carga-deflexão ajustada após o ensaio SPT. ....	138
<b>Figura 75</b> – Esquema do corte do corpo de prova após ensaio SPT. ....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correlação entre Impacto <i>Charpy</i> e Tenacidade à fratura $K_{IC}$ para o patamar inferior de energia.....	41
Tabela 2 – Correlação entre Impacto <i>Charpy</i> e Tenacidade à fratura $K_{IC}$ para o patamar superior de energia.....	42
Tabela 3 – Correlação entre Impacto <i>Charpy</i> e Tenacidade à fratura $K_{IC}$ para a região de transição de energia. ....	43
Tabela 4 – Ensaio para caracterização do aço API 5DP <i>Tool Joint</i> .....	68
Tabela 5 – Composição química do aço API 5DP <i>Tool Joint</i> . Apresentação dos elementos em percentual de massa. ....	79
Tabela 6 – Resultado do ensaio de tração do aço API 5DP <i>Tool Joint</i> . ....	81
Tabela 7 – Valor de tenacidade à fratura a partir do ensaio de Impacto <i>Charpy</i> . ....	85
Tabela 8 – Excentricidade da indentação nos corpos de prova do ensaio SPT.....	90
Tabela 9 – Intervalo utilizado para ajuste das funções $f(u_a)$ e $f(u_b)$ . ....	91
Tabela 10 – Avaliação do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para determinação das retas de ajuste da curva do ensaio SPT e determinação da carga $F_e$ .....	92
Tabela 11 – Resultados do ensaio SPT para carga $F_e$ . ....	92
Tabela 12 – Determinação da tensão de escoamento utilizando parâmetros proposto por Mao. ....	93
Tabela 13 – Determinação da tensão de escoamento utilizando os coeficientes ajustados pelo autor. ....	95
Tabela 14 – Determinação da tensão de escoamento utilizando parâmetros ajustados por diferentes publicações.....	96
Tabela 15 – Resultados do ensaio SPT para carga $F_m$ .....	98
Tabela 16 – Determinação da tensão máxima utilizando os coeficientes propostos por Mao. ....	99
Tabela 17 – Determinação da tensão máxima utilizando os coeficientes ajustados pelo autor. ....	101
Tabela 18 – Determinação da tensão máxima utilizando parâmetros ajustados por diferentes publicações. ....	102
Tabela 19 – Resultados do ensaio SPT para carga $F_f$ e energia de fratura ESP. ....	103
Tabela 20 – Determinação da tenacidade à fratura $J_{IC}$ utilizando os coeficientes propostos por Mao.....	104
Tabela 21 – Determinação da tenacidade à fratura utilizando os coeficientes ajustados pelo autor. ....	106
Tabela 22 – Resultado da medição de espessura dos corpos de prova do ensaio SPT após lixamento. ....	115
Tabela 23 – Resultado da rugosidade superficial dos corpos de prova do ensaio SPT após lixamento. ....	116
Tabela 24 – Resultado do ensaio de impacto <i>Charpy</i> do aço API 5DP <i>Tool Joint</i> .....	123
Tabela 25 – Resultado da medição dos corpos de prova do ensaio SPT após ensaiado. ....	128

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>The American Petroleum Intitute</i>
ASD	<i>Allowable Stress Design</i>
ASME	<i>The American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
CEGN	<i>Canadian Environmental Grantmakers Network</i>
CEN	<i>Comité Europeen de Normalisation</i>
CP	Corpo de prova
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
CVN	Charpy V Noutch
CWA	<i>CEN Workshop Agreement</i>
EDP	Estado de Deformações Plana
EN	<i>European Standards</i>
ENG	Engastado
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ETP	Estado de Tensões Plana
EUA	Estados Unidos da América
FAD	<i>Failure Assessment Diagram</i>
FFS	<i>Fitness-For-Service</i>
IACS	<i>International Association of Classification Societies</i>
INSTA	<i>Materials Standards Instituion</i>
ISO	<i>International Institute of Standards</i>
JSME	<i>Japan Society of Mechanical Engineers</i>
LIV	Livre
MDBT	<i>Miniaturized Disk Bend Test</i>
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
SINTAP	<i>Structural Integrity Assessment Procedure</i>
SPT	<i>Small Punch Test</i>
TTDT	Temperatura de transição dúctil - frágil
WRC	<i>Welding Research Council</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{\varepsilon}_{SP}^{max}$	Taxa de deformação máxima no ensaio de SPT
$h_0$	Espessura inicial do corpo de prova no ensaio SPT
$h_f$	Espessura mínima da secção fraturada do corpo de prova no ensaio SPT
$E^{SP}$	Energia de fratura no ensaio SPT
$F_e$	Carga que caracteriza a transição da linearidade elástica para a plasticidade devido a flexão durante o ensaio SPT
$F_f$	Carga corresponde ao início da fratura registrada durante o ensaio SPT
$F_m$	Carga máxima registrada durante o ensaio SPT
$J_{IC}$	Valor de Integral J crítico no modo I de sollicitação
$K_{Ic}$	Intensificador de tensão crítico no modo I de sollicitação
$f_A$	Carga no ponto A da curva ajustada no ensaio SPT
$f_B$	Carga no ponto B da curva ajustada no ensaio SPT
$u_A$	Deslocamento no ponto A da curva ajustada no ensaio SPT
$u_B$	Deslocamento no ponto B da curva ajustada no ensaio SPT
$u_e$	Deslocamento correspondente a carga $F_e$
$u_f$	Deslocamento correspondente a carga $F_f$
$u_m$	Deslocamento correspondente a carga $F_m$
$\varepsilon_f$	Deformação efetiva de fratura no ensaio SPT
$\sigma_{YS}$	Tensão de escoamento do material
$\sigma_f(SP)$	Tensão de fratura no ensaio SPT
B	Espessura do corpo de prova
D	Diâmetro da sede inferior do ensaio SPT
d	Diâmetro do penetrador do ensaio SPT
h	Espessura do corpo de prova no ensaio SPT
$\alpha$	Constante de ajuste
E	Modulo de elasticidade do material
$F(u)$	Função que descreve a curva dos dados coletados durante o ensaio SPT
J	Integral J
K	Intensificador de tensão
W	Largura do corpo de prova
a	Comprimento da trinca
b	Comprimento do ligamento do corpo de prova sem fratura
$f(u)$	Função bilinear que descreve a curva ajustada dos dados coletados durante o ensaio SPT
u	Deslocamento
$\beta$	Constante de ajuste
$\nu$	Coefficiente de Poisson
k	Constante de ajuste
$J_0$	Constante de ajuste

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	O ESTUDO.....	17
1.2	OBJETIVO .....	20
1.2.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	20
1.2.2	<b>Objetivos Específicos:</b> .....	20
1.3	JUSTIFICATIVA .....	20
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2</b>	<b>DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS</b> .....	22
2.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS METAIS .....	22
2.2	TENACIDADE À FRATURA DOS METAIS .....	26
2.2.1	<b>Conceitos preliminares</b> .....	26
2.2.2	<b>Ensaio de tenacidade à fratura</b> .....	35
2.2.3	<b>Ensaio de Impacto Charpy</b> .....	37
<b>3</b>	<b>ENSAIO MINIATURIZADO POR PENETRAÇÃO</b> .....	45
3.1	EXECUÇÃO DO ENSAIO SPT E TRATAMENTO DOS RESULTADOS .....	49
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODO</b> .....	66
4.1	INTRODUÇÃO.....	66
4.2	MATERIAL .....	66
4.3	MÉTODO PARA EXECUÇÃO EXPERIMENTAL .....	68
4.3.1	<b>Análise Química</b> .....	68
4.3.2	<b>Análise Microestrutural</b> .....	68
4.3.3	<b>Ensaio de tração</b> .....	69
4.3.4	<b>Ensaio de Impacto Charpy</b> .....	70
4.3.5	<b>Ensaio SPT</b> .....	72
4.4	MÉTODO PARA TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS .....	77
4.4.1	<b>Análise Química</b> .....	77
4.4.2	<b>Análise Microestrutural</b> .....	77
4.4.3	<b>Ensaio de tração</b> .....	77
4.4.4	<b>Ensaio de Impacto Charpy</b> .....	77
4.4.5	<b>Ensaio de SPT</b> .....	78
<b>5</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	79



5.1	ANÁLISE QUÍMICA.....	79
5.2	ANÁLISE METALOGRAFICA.....	79
5.3	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	81
5.4	ENSAIO IMPACTO <i>CHARPY</i> .....	83
5.5	ENSAIO SPT .....	86
5.5.1	Determinação da tensão de escoamento .....	93
5.5.2	Determinação da tensão máxima .....	97
5.5.3	Determinação da tenacidade à fratura .....	103
6	CONCLUSÃO.....	108
	REFERÊNCIAS.....	110
	APÊNDICE A – MEDIÇÕES DOS CORPOS DE PROVA SPT APÓS LIXAMENTO .....	115
	APÊNDICE B – DETALHAMENTO DO DISPOSITIVO DE TESTE SPT .....	117
	APÊNDICE C – AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS AMOSTRAS DO ENSAIO DE IMPACTO <i>CHARPY</i> .....	122
	APÊNDICE D – MEDIÇÕES DOS CORPOS DE PROVA SPT APÓS ENSAIO .....	128
	APÊNDICE E – MEDIÇÃO DA EXCENTRICIDADE DA INDENTAÇÃO DO CORPO DE PROVA DO ENSAIO SPT .....	129
	APÊNDICE F – MICROESTRUTURA DA REGIÃO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA SPT .....	130
	ANEXO A – METODOLOGIA PARA O ENSAIO SPT CONFORME CWA 15627 ..	132

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O ESTUDO

A falha de estruturas e equipamentos sempre esteve presente no desenvolvimento histórico do homem, acumulando vultuosas perdas financeiras devido aos danos causados ao patrimônio e consequências irreparáveis como a morte de pessoas. Essas falhas são causadas por erros na fabricação, na montagem, na avaliação das cargas atuantes, na seleção dos materiais, na inobservância de mecanismos de danos atuantes durante sua vida útil, entre outros (DUCKETT, 2005; HAAN, 2012; MCEVILY, 2001; MELCHERS, 1989; RAZVAN, 2009).

Até a primeira metade da década de 1980, o critério de falha amplamente utilizado para o projeto de estruturas e equipamentos mecânicos era baseado em tensão admissível (ASD – *Allowable Stress Design*), cujo parâmetro de integridade era que a tensão solicitante deveria ser menor que a resistência do material, dividido por um fator de segurança. Contudo, com a elaboração de projetos cada vez mais complexos, em que as tensões atuantes nem sempre são fáceis de serem determinadas, começaram a ocorrer falhas em condições de solicitação menores do que as previstas na fase de projeto. Isso levou à observação de quais fatores influenciavam na integridade de uma estrutura ou equipamento, para além das solicitações de projeto, incluindo os tipos e as diversas incertezas nas cargas aplicadas, na determinação das propriedades mecânicas, nos modos de falhas e nas geometrias aplicadas. Foi observado que, entre outros aspectos, para condições de baixa temperatura, restrições geométricas e descontinuidade no material, essas falhas ocorriam em circunstâncias de carregamento inferior ao previsto pelo projetista via um mecanismo de fratura frágil (COSSIO et al., 2012; GALAMBOS, 1990; HAAN, 2012; SALMON; JOHNSON; MALHAS, 2009).

Quando o material de construção apresenta um comportamento frágil durante a propagação de uma descontinuidade, tem-se uma das formas mais dramáticas de falha estrutural. A descontinuidade que apresenta maior severidade para essa condição são as trincas. Sua origem pode ser uma imperfeição decorrente do processo de beneficiamento da matéria prima, descontinuidades produzidas durante a construção da estrutura ou adquiridas durante a vida em serviço (BARSOM; ROLFE, 1999; HERTZBERG, 1996; MCEVILY, 2001).

Face a essas imperfeições, quase impossíveis de serem eliminadas, desenvolveu-se o ramo da engenharia denominado Mecânica da Fratura, para estudar o nível de tolerância possível às trincas, garantindo assim a integridade de estruturas e equipamentos. Para tanto, a mecânica da fratura visa calcular determinados parâmetros (e.g. Fator de Intensidade de Tensão,

CTOD - *Crack Tip Opening Displacement* e integral J) para a avaliação da propagação ou não da trinca de forma instável, considerando-se o tamanho e a forma da trinca e o estado de tensões na sua vizinhança, assim como comparando-se esses valores com a tenacidade à fratura do material, que seria a energia liberada para a abertura de uma trinca.

Com o desenvolvimento desses estudos, foram escritos códigos e normas aplicados à avaliação da integridade estrutural de equipamentos na presença de trincas. Dentre esses documentos, destacam-se o API-579-1/ASME FFS-1 (2016), o BS 7910 (2013), o R6 (CEGN, 1986), o SAQ (2008) e o SINTAP (2007), os quais são mundialmente reconhecidos e aplicados. Além das trincas, nesses documentos, são abordadas avaliações para outros tipos de descontinuidades, como por exemplo: redução de espessura localizada e generalizada, *pitting*, empolamento, distorção e desalinhamento em junta soldada, delaminação, etc.

As normas citadas acima apresentam, de uma maneira geral, a metodologia FAD (*Failure Assessment Diagram*) para a avaliação da integridade estrutural do equipamento sob estudo. Assim, para atender a condição de segurança, os materiais devem apresentar certas características mecânicas que possam prevenir a formação de trincas ou, na sua presença, minimizar ou até mesmo anular os seus efeitos.

As principais características mecânicas dos aços para a avaliação de integridade são: Tensão de Escoamento; Tensão Máxima; Módulo de Elasticidade; Coeficiente de Poisson e a Tenacidade à fratura. Para quantificar essas características, existem várias entidades que padronizam os ensaios a serem executados, tais como: *American Society for Testing and Materials* (ASTM); *British Standards Institution* (BSI); *International Institute of Standards* (ISO); *Japan Society of Mechanical Engineers* (JSME).

O grau de incerteza dos dados disponíveis sobre as características mecânicas do material determina o nível de conservadorismo do coeficiente de segurança que é aplicado na avaliação de integridade estrutural. Podem ser utilizados os dados do material na condição de novo, contudo essa é uma opção não conservadora para a avaliação da integridade de equipamentos e estruturas em serviço, uma vez que esses podem estar expostos a meios agressivos, apresentarem degradações ou danos acumulativos que alteram significativamente seu comportamento mecânico. Como exemplo das condições que podem alterar as características mecânicas do material na condição em serviço, pode-se citar equipamentos da indústria nuclear, os quais, ao serem expostos à radiação de nêutrons, têm sua temperatura de transição dúctil-frágil alterada, modificando o comportamento do material à fratura (MISAWA et al, 1985). Outra situação comum na indústria em geral é a utilização de juntas soldadas, cujo material

passa por vários ciclos térmicos que resultam em alterações microestruturais na peça, destacadamente em uma região específica, denominada zona termicamente afetada, prejudicando suas propriedades mecânicas, tais como: o limite de escoamento, a dureza e a tenacidade à fratura. Prejuízo semelhante vê-se também em estruturas submetidas a ambientes contendo contaminantes como hidrogênio. Já a capacidade de estruturas suportarem esforços trabalhando na condição de fluência, altas temperaturas associadas a cargas trativas, é fortemente reduzida, em função do tempo e da combinação de carga e temperatura. Assim, quando os dados sobre o material de construção do equipamento são desconhecidos, faz-se necessário recorrer a dados publicados ou à remoção de amostras do próprio equipamento para a análise. Em todo caso, para se determinar os parâmetros para a avaliação de integridade estrutural são necessários corpos de prova do material a serem estudados em determinadas proporções que, devido às suas dimensões elevadas, às vezes, inviabilizam sua execução, uma vez que o material disponível está numa quantidade limitada ou demandam, após a remoção, reparos do próprio componente sob estudo. Como uma alternativa a esses ensaios convencionais, foram desenvolvidos ensaios com corpos de prova de dimensões miniaturizadas que podem chegar a menos de 1% do volume dos ensaios convencionais. Dentre as técnicas desenvolvidas com essa finalidade, o ensaio miniaturizado por penetração *Small Punch Test* (SPT) vem-se consolidando como um método viável para a determinação dos parâmetros de fratura e resistência mecânica para materiais metálicos.

A utilização de uma pequena porção de material para caracterização das propriedades mecânicas é a principal vantagem do ensaio SPT. Esse diferencial confere ao ensaio a possibilidade de remoção de amostras em estruturas em serviço sem a necessidade de reparo posterior, como no caso de peças soldadas e expostas à radiação, em que pequenas regiões do material que foram afetadas localmente são analisadas. Ainda no campo da indústria nuclear, as amostras ocupam menos espaço dentro dos reatores, garantindo assim a possibilidade de ensaiar uma quantidade maior de amostras para ciclos de tempo diferenciados.

Neste trabalho, foi utilizada a metodologia proposta pelo guia europeu CWA 15627:2007 para a caracterização das propriedades de resistência mecânica e de tenacidade à fratura do aço *API 5DP Tool Joint*, através do ensaio SPT, em que os resultados foram comparados com os resultados do ensaio convencional de tração e com o valor publicado, obtido através do ensaio convencional de tenacidade quando é determinado o CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*). Foi realizado o ensaio de impacto *Charpy* e determinado, através de formulação empírica, o valor da tenacidade à fratura do material como medida complementar

para a avaliação da precisão na determinação do valor de tenacidade à fratura do material por meio de ensaio alternativo ao ensaio de CTOD, já consagrado na literatura.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a aplicação do ensaio SPT, baseado no guia europeu CWA 15627:2007, como um método para determinação das propriedades mecânicas de tensão máxima, tensão de escoamento e tenacidade à fratura do aço API 5DP *Tool Joint*.

### 1.2.2 Objetivos Específicos:

- a. Determinar a tensão máxima e tensão de escoamento do aço API 5DP *Tool Joint*, através do ensaio convencional de Tração;
- b. Determinar a tenacidade à fratura do aço API 5DP *Tool Joint*, através do ensaio de Impacto *Charpy*;
- c. Determinar as propriedades mecânicas de tensão máxima, de tensão de escoamento e de tenacidade à fratura do aço API 5DP *Tool Joint*, através do ensaio miniaturizado por penetração *Small Punch Test* (SPT);
- d. Avaliar a correlação entre o valor da tensão máxima e da tensão de escoamento do aço API 5DP *Tool Joint* obtido pelo ensaio convencional de Tração com o valor obtido, através do ensaio SPT;
- e. Avaliar a correlação entre o valor de tenacidade à fratura do aço API 5DP *Tool Joint* obtido pelo ensaio convencional da Mecânica da Fratura CTOD já publicado (HAAG, 2015), com o valor estimado utilizando os resultados do ensaio de Impacto *Charpy* e os resultados do ensaio SPT;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Para a avaliação da integridade de equipamentos e estruturas, especialmente em serviço, é necessário conhecer o desempenho do material nessa condição. Sendo assim, ensaios mecânicos destrutivos são necessários para determinar os parâmetros utilizados na análise do

comportamento do material sob as condições de projeto na presença de descontinuidades. Esses ensaios necessitam de grande quantidade de material, que, na maioria dos casos, inviabilizam a funcionalidade do equipamento ou da estrutura de onde foi extraído para a caracterização. O desenvolvimento de um método confiável que utilize pequenas frações de material para determinação dos parâmetros de fratura e de resistência mecânica, minimizando ou até mesmo descartando a necessidade de reparos após a sua remoção, irá contribuir de forma direta para elevar o nível de segurança das instalações em escala global, reduzindo o custo com manutenção e aumentando a confiabilidade e disponibilidade operacional dos segmentos industriais.

Sendo assim, foi conduzido o ensaio miniaturizado por penetração para a caracterização de uma amostra do material API 5DP Tool Joint. As amostras foram retiradas de um tubo usado, contudo este apresentava-se em boas condições, não sendo detectada nenhuma indicação de descontinuidade proveniente de danos em serviço que pudessem alterar as características mecânicas dos corpos de prova ensaiados. Esse material foi escolhido pela sua facilidade de obtenção, e a existência de dados já publicados para tensão de escoamento, tensão máxima, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tenacidade à fratura, através de ensaios convencionais à temperatura ambiente.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Uma breve revisão dos conceitos básicos sobre ensaios mecânicos para determinação das propriedades mecânica de resistência e tenacidade à fratura são apresentados no Capítulo 2. O Capítulo 3 apresenta o ensaio miniaturizado por penetração, *Small Punch Test* (SPT). O Capítulo 4 aborda o procedimento experimental utilizado para o tratamento dos dados e execução dos ensaios de tração, impacto *Charpy* e o SPT para caracterização do material API 5DP *Tool Joint*. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios executados e na sequência a discussão dos dados. O Capítulo 6 apresenta a conclusão deste estudo e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS METAIS

Para assegurar que o projeto de uma estrutura não apresente um nível de deformação e/ou tensão excessivo, ocasionando o desenvolvimento de descontinuidades, fraturas ou até mesmo seu colapso, é preciso garantir a seleção adequada do material de construção para cada elemento estrutural. Considerando-se que o comportamento mecânico do material na condição de serviço é o resultado da relação entre suas propriedades mecânicas e as deformações e/ou tensões impostas pelas cargas e forças atuantes no sistema, a determinação das propriedades mecânicas do material é de suma importância para o êxito do projeto e da análise de integridade de estruturas e sua determinação se dá através da realização de ensaios mecânicos.

Os ensaios mecânicos são conduzidos seguindo metodologias internacionalmente difundidas, garantindo assim a comparação dos resultados obtidos em diferentes laboratórios. Em geral, essas metodologias visam garantir a reprodução das condições de serviço o mais fielmente possível, a partir de um corpo de prova padronizado. Entre as entidades existentes que padronizam os ensaios mecânicos, destacam-se: *American Society for Testing and Materials (ASTM)*; *British Standards Institution (BSI)*; *International Institute of Standards (ISO)*; *Japan Society of Mechanical Engineers (JSME)*.

As principais propriedades mecânicas dos metais, determinadas através de ensaios mecânicos, que são utilizadas na avaliação de engenharia são: resistência à tração; ductilidade; tenacidade à fratura; dureza; resistência à fluência; resistência à fadiga. Essas propriedades são diretamente alteradas por uma série de fatores, que podem agir de forma isolada ou combinada. Dentre esses fatores, destacam-se: composição química do material, processos de fabricação, de acabamento e de conformação, tamanho de grãos da estrutura metalúrgica, espessura do material, temperatura de ensaio e tratamentos térmicos realizados.

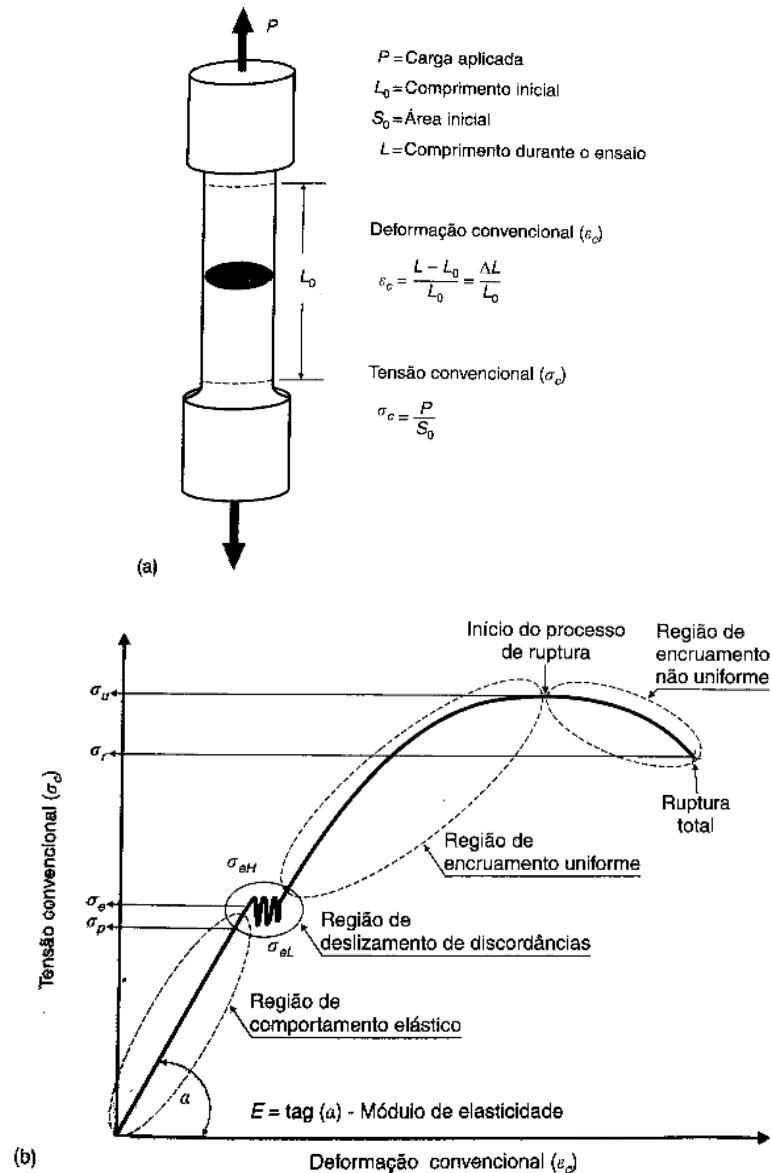
Assim, o atual trabalho foca nos ensaios para a determinação das propriedades mecânicas de resistência (tensão de escoamento e tensão máxima) e tenacidade à fratura. A seguir, será apresentada uma breve abordagem sobre as metodologias convencionais para a obtenção dessas propriedades mecânicas.

### 2.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS METAIS

A resistência mecânica dos metais é determinada através da realização do ensaio de tração. Esse consiste na aplicação gradativa de uma carga de tração uniaxial crescente nas

extremidades de um corpo de prova padronizado até a sua ruptura. O resultado do ensaio de tração é avaliado a partir da obtenção da curva tensão vs. deformação do material durante o teste. A Figura 1 ilustra um tipo de corpo de prova empregado no ensaio de tração (cilíndrico) e as relações utilizadas para a determinação dos valores de tensão e de deformação que são obtidos a partir dos dados característicos da curva convencional do ensaio de tração.

**Figura 1** – Representação do ensaio de tração.



Fonte: (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012). (a) corpo de prova cilíndrico. (b) curva convencional obtida no ensaio de tração.

As principais informações extraídas da curva tensão vs. deformação convencional para utilização em avaliação de engenharia são:



- a) Tensão proporcional – Tensão máxima até a qual a relação linear entre tensão e deformação é válida. Determina o limite da deformação elástica do material;
- b) Tensão de escoamento – Tensão que representa o início da deformação plástica do material. Em termos práticos é igualada à tensão proporcional;
- c) Tensão máxima – Representa o valor máximo de tensão normal no gráfico convencional correspondente à carga máxima axial que o corpo de prova suporta sem iniciar o processo de colapso ou ruptura;
- d) Tensão de ruptura – É a tensão normal no gráfico convencional no instante da ruptura do corpo de prova;
- e) Módulo de elasticidade longitudinal – Também conhecido como módulo de Young, representa a inclinação da região inicial da curva tensão vs. deformação do material, ou seja, é o quociente da tensão convencional pela deformação convencional na região linear da curva;
- f) Módulo de resiliência – É a energia de deformação elástica máxima por unidade de volume que o material pode absorver sem escoar. É obtido pela área sob a curva tensão vs. deformação calculada da origem até o limite de proporcionalidade;
- g) Módulo de tenacidade: É a energia de deformação por unidade de volume que o material pode absorver até a ruptura. É obtido pela área total sob a curva tensão vs. deformação.

A curva tensão vs. deformação convencional baseia-se nas dimensões originais do corpo de prova. Essa condição não representa o real comportamento do material, uma vez que suas dimensões se modificam continuamente no decorrer do ensaio de tração. Dessa forma, são necessárias medidas de tensão e de deformação que se baseiem nas dimensões instantâneas do ensaio. Para tanto é utilizada a relação numérica apresentada nas equações 1 e 2 para a conversão das tensões e deformações convencionais ( $\sigma_c, \varepsilon_c$ ) em tensões e deformações reais ( $\sigma_r, \varepsilon_r$ ) (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

$$\varepsilon_r = \ln(\varepsilon_c + 1), \quad (1)$$

$$\sigma_r = \sigma_c(\varepsilon_c + 1). \quad (2)$$

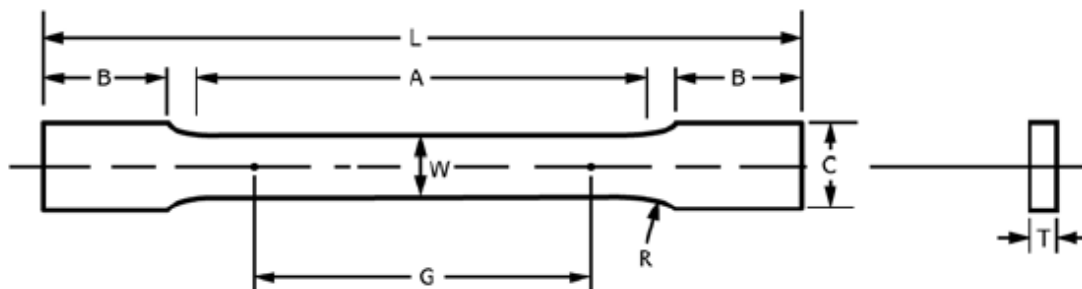
Sendo que a curva tensão vs. deformação real, para a maioria dos metais, pode ser representada pela seguinte relação de potência:

$$\sigma_r = k \cdot \varepsilon_r^n, \quad (3)$$

Na equação acima,  $k$  é denominado como coeficiente de resistência, medido em Pascal, e  $n$  é denominado como coeficiente de encruamento (adimensional).

A norma ASTM E8, por exemplo, apresenta as dimensões para o corpo de prova padrão ao ensaio convencional de tração e exibe dimensões para o corpo de prova reduzido (*Subsize*), que consiste basicamente na utilização dos mesmos corpos de prova, contudo, em uma escala menor de tamanho. Os corpos de prova reduzidos são uma alternativa aos padrões, pois tentam minimizar os impactos causados às estruturas na hora da remoção das amostras a serem ensaiadas ou na situação em que a quantidade de material disponível é limitada. A Figura 2 ilustra as principais dimensões utilizadas para a confecção do corpo de prova de tração padrão e reduzido.

**Figura 2** – Dimensões do corpo de prova convencional de tração pela norma ASTM E8.



Dimensões [mm]			
	Padrão		Reduzida
$G$	$200,0 \pm 0,2$	$50,0 \pm 0,1$	$25,0 \pm 0,1$
$W$	$40,0 \pm 2,0$	$12,5 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,1$
$T$	Espessura do material		
$R$	25,0	12,5	6,0
$L$	450,0	200,0	100,0
$A$	225,0	57,0	32,0
$B$	75,0	50,0	30,0
$C$	50,0	20,0	10,0

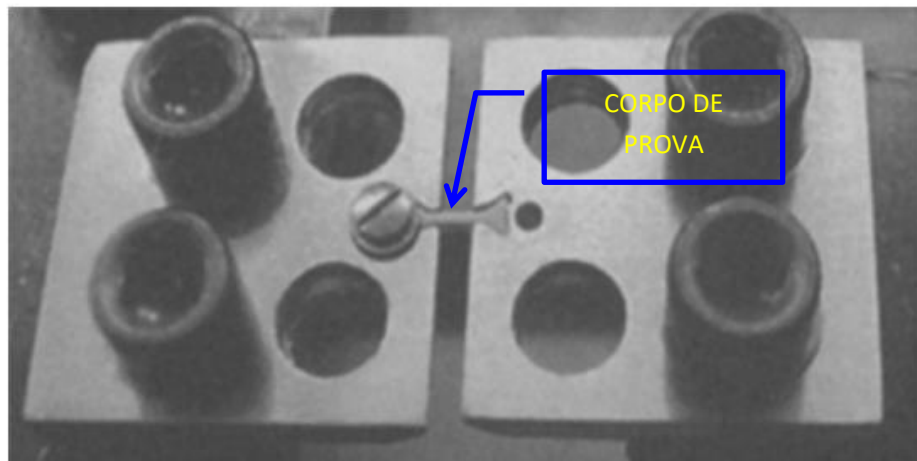
Fonte: (ASTM, 2016a) Adaptado pelo autor.

Apesar da previsão das normas de ensaio para um corpo de prova reduzido, ainda assim, as dimensões aplicadas a esse possuem valores que, a depender do tamanho da estrutura sob estudo, apresentará os mesmos inconvenientes do corpo de prova com tamanho padrão.

Na tentativa de contornar o problema imposto pela dimensão do corpo de prova, alguns autores desenvolveram corpos de prova com dimensões menores do que os denominados reduzidos. Esses são conhecidos como corpos de prova miniaturizados. Nesses corpos de prova,

o comprimento da região útil ( $G$ ), ver Figura 2, é até cento e vinte e cinco vezes menor do que o corpo de prova reduzido. O princípio do ensaio é o mesmo para a condição reduzida e miniaturizada. A Figura 3 ilustra um corpo de prova miniaturizado que possui dimensões de 3,0 x 0,2 x 0,2 mm. Esse corpo de prova foi utilizado por LaVan (1999) *apud* (KARTHIK; KASIVISWANATHAN; RAJ, 2016).

**Figura 3** – Representação de um corpo de prova de tração miniaturizado.



Fonte: (KARTHIK; KASIVISWANATHAN; RAJ, 2016).

Entretanto, o ensaio miniaturizado de tração proposto por LaVan, ainda não possui uma padronização normativa. Por outro lado, o ensaio miniaturizado por penetração *Small Punch Test* (SPT) está em vias de padronização normativa, por destacar-se como uma promissora possibilidade de teste para a caracterização mecânica de materiais metálicos, pois além dos requisitos de resistência é possível determinar os requisitos de tenacidade através de uma única amostra ensaiada. Esse método de ensaio será detalhado no decorrer do Capítulo 3.

## 2.2 TENACIDADE À FRATURA DOS METAIS

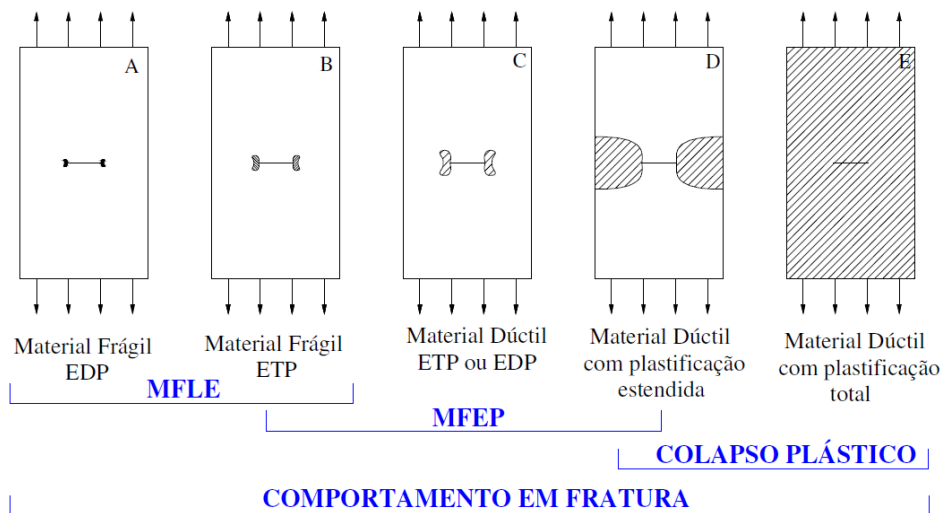
### 2.2.1 Conceitos preliminares

A tenacidade à fratura dos metais é determinada através da realização dos ensaios previstos pela Mecânica da Fratura. A Mecânica da Fratura é o ramo da engenharia que estuda e desenvolve métodos para subsidiar a análise de integridade de equipamentos e de estruturas com trincas, as quais geram descontinuidades e elevados gradientes nos campos de tensão e de deformação. Nesses casos, uma condição limite é a propagação instável da trinca até a ruptura

do elemento analisado. Essa visão vem contrapor os métodos tradicionais baseados em resistência mecânica em um meio contínuo, de modo que o critério de falha é o colapso plástico, e o parâmetro utilizado para avaliação é o limite de escoamento do material, obtido através do ensaio convencional de tração. Assim, a Mecânica da Fratura analisa a integridade estrutural do sólido, relacionando sua resistência à falha frente ao tamanho da trinca e ao estado de tensão na região da ponta da trinca a que o sólido está submetido, trabalhando com um parâmetro de fratura, que é a tenacidade do material sob estudo.

A partir dessa visão, para estudar o comportamento dos materiais durante a falha, a Mecânica da Fratura foi dividida em dois ramos: A Mecânica da Fratura Linear Elástica, na qual é esperado um comportamento frágil do material, sendo sua aplicação direcionada ao regime elástico. A falha nesse regime é caracterizada por uma rápida propagação instável da trinca. O outro ramo é a Mecânica da Fratura Elastoplástica, em que é esperada uma plastificação significativa na ponta da trinca. A falha nesse regime é caracterizada por uma propagação instável da trinca, podendo ser precedida por uma região plástica na ponta da trinca. A Figura 4 apresenta um esquema ilustrando o domínio de cada ramo da Mecânica da Fratura.

**Figura 4** – Representação do campo de aplicação da Mecânica da Fratura.



Fonte: (MEDINA, 2014).

Para cada ramo de estudo da Mecânica da Fratura, há um nível de plastificação na extremidade da trinca que está relacionado ao comportamento do material quando solicitado. Sendo assim, existem parâmetros distintos que são utilizados na avaliação da propagação da trinca e que são obtidos através de ensaios mecânicos normatizados. Tem-se para a:

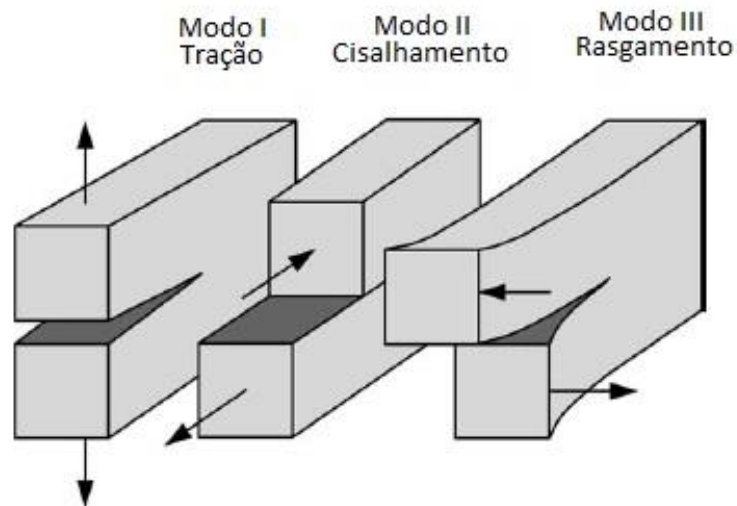
a) Mecânica da Fratura Linear elástica (MFLE):

No caso da MFLE aplicada a materiais com comportamento frágil, utiliza-se, como parâmetro de avaliação da trinca, o Fator de Intensidade de Tensão  $K$ , o qual é comparado com a propriedade Tenacidade à Fratura, que é o valor crítico de  $K$  para um determinado estado de carregamento ou tensão na ponta da trinca.

A abordagem de intensificador de tensão foi apresentada por Irwin (1957) com base nos trabalhos de Westergaard (1939), que apresentou uma solução para determinar as tensões na vizinhança da ponta de uma trinca, e no trabalho de Orowan (1944), o qual apresentou a existência de um intensificador de tensão na proximidade de uma trinca que é influenciada pela geometria da estrutura, pela condição de carregamento e pelo formato da trinca.

A abordagem de intensidade de tensão leva em consideração o modo de carregamento da trinca, conforme ilustrado na Figura 5. Tais modos caracterizam como as superfícies das trincas se deslocam. O modo I é denominado de abertura ou tração, no qual o corpo é submetido a um carregamento na direção perpendicular ao plano da trinca, tendendo a abrir a mesma. O modo II é conhecido como modo de deslizamento ou cisalhamento, cujo corpo está sob um carregamento no mesmo plano da trinca, tendendo a escorregar uma superfície contra a outra. O modo III, denominado de rasgamento, caracteriza-se pela aplicação de carga para fora do plano da trinca, provocando um escorregamento das superfícies. Um corpo trincado pode apresentar qualquer dos modos apresentados ou combinações desses, sendo que a condição de engenharia mais encontrada na prática é o modo I.

**Figura 5** – Modos de carregamento aplicáveis as trincas.



Fonte: (ANDERSON, 2005). Adaptado pelo autor.

Dessa forma, Irwin deduziu que o campo de tensão à frente de uma trinca no modo I de carregamento, para um material isotrópico com comportamento linear elástico, é expresso pela equação 4 e ilustrado pela Figura 6.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\end{aligned}\quad (4)$$

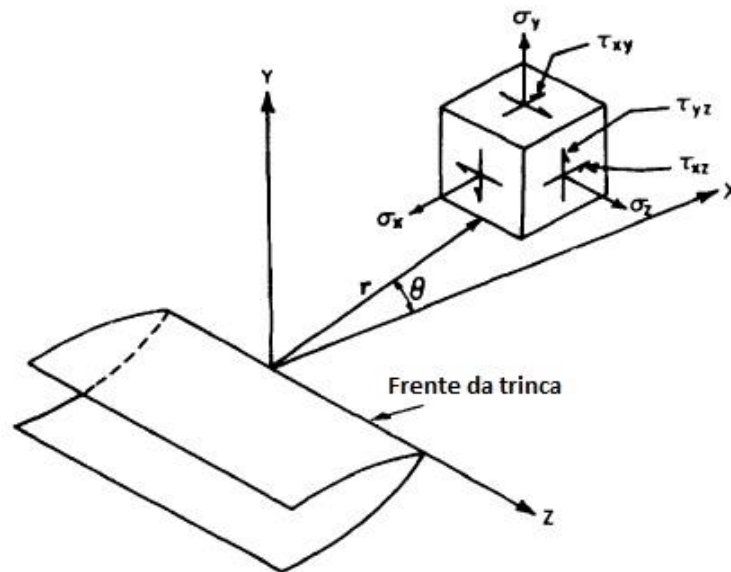
$$\sigma_z = 0 \text{ [Estado plano de tensões]}$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ [Estado plano de deformações]}$$

$$\tau_{xz,yz} = 0$$

$\nu = \text{Poisson}$

**Figura 6** – Estado de tensão na frente da trinca.



Fonte: (BARSOM; ROLFE, 1999). Adaptado pelo autor.

O valor  $K_I$  é o fator de intensidade de tensão, no modo de carregamento de tração da trinca, definido por Irwin. Quando seu valor atingir uma medida crítica,  $K_{Ic}$ , o material irá falhar. Essa medida é o critério de falha de Irwin que representa a tenacidade do material à fratura.

Considerando o ângulo  $\theta = 0$  na equação 4, tem-se o seguinte campo de tensão:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \\ \tau_{xy} &= 0\end{aligned}\quad (5)$$

$$\sigma_z = 0 \text{ [Estado plano de tensões]}$$

Assim, existe uma relação direta entre o valor do fator de intensidade de tensão na ponta da trinca e o estado global de tensão da estrutura e a dimensão da trinca.

$$K_I = \sigma\sqrt{2\pi r}. \quad (6)$$

As equações elaboradas por Irwin são válidas para uma região próxima a ponta da trinca, denominada zona de domínio da singularidade. As expressões elaboradas por Irwin possuem a seguinte forma geral:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} f(a/W). \quad (7)$$

Observa-se que  $f(a/W)$  representa a solução para diferentes configurações geométricas para estruturas trincadas.

#### b) Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP):

Os parâmetros normalmente utilizados para a determinação da tenacidade à fratura para materiais com comportamento dúctil são: Integral J e CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*).

A Mecânica da Fratura Elastoplástica é aplicada para os casos em que a MFLE não representa, de forma confiável, a tenacidade à fratura do material, devido ao nível de deformação plástica apresentada na ponta da trinca sob estudo.

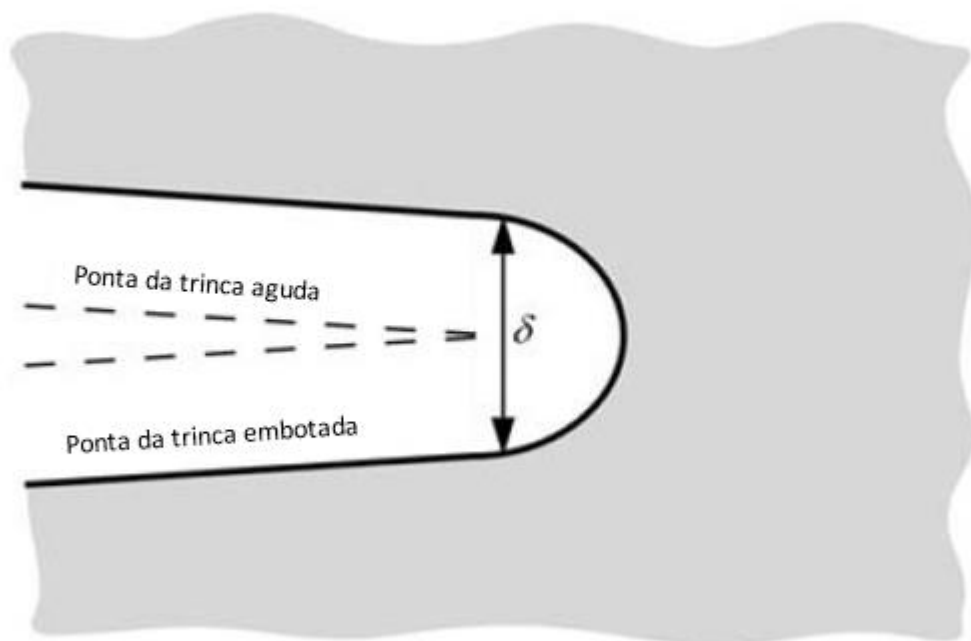
O parâmetro CTOD mede a abertura da ponta da trinca, e o parâmetro integral J é o valor da taxa de liberação de energia de deformação encontrada no material durante a propagação da trinca.

O parâmetro CTOD é o mais utilizado para a obtenção da tenacidade à fratura dos materiais, devido a sua simplicidade para medição em ensaio mecânico. Já o parâmetro integral

J, devido ao seu caráter matemático, é mais utilizado para soluções numéricas como o método dos elementos finitos.

O parâmetro CTOD foi determinado a partir dos experimentos conduzidos por Wells (WELLS, 1961) com diversos materiais para obtenção do valor de tenacidade à fratura  $K_{IC}$ . Contudo, esses materiais apresentavam uma tenacidade elevada, não sendo possível ser caracterizada pela MFLE. Wells, assim, percebeu que os materiais testados apresentavam um afastamento das faces da fratura antes de sua propagação, que foi caracterizado pelo embotamento da ponta da trinca antes da propagação, conforme ilustrado na Figura 7. Por conseguinte, o autor estabeleceu a relação entre o grau de embotamento e a tenacidade do material, sendo essa abertura  $\delta$  conhecida por CTOD (ANDERSON, 2005).

**Figura 7** – Embotamento da ponta de uma trinca.



Fonte: (ANDERSON, 2005). Adaptado pelo autor.

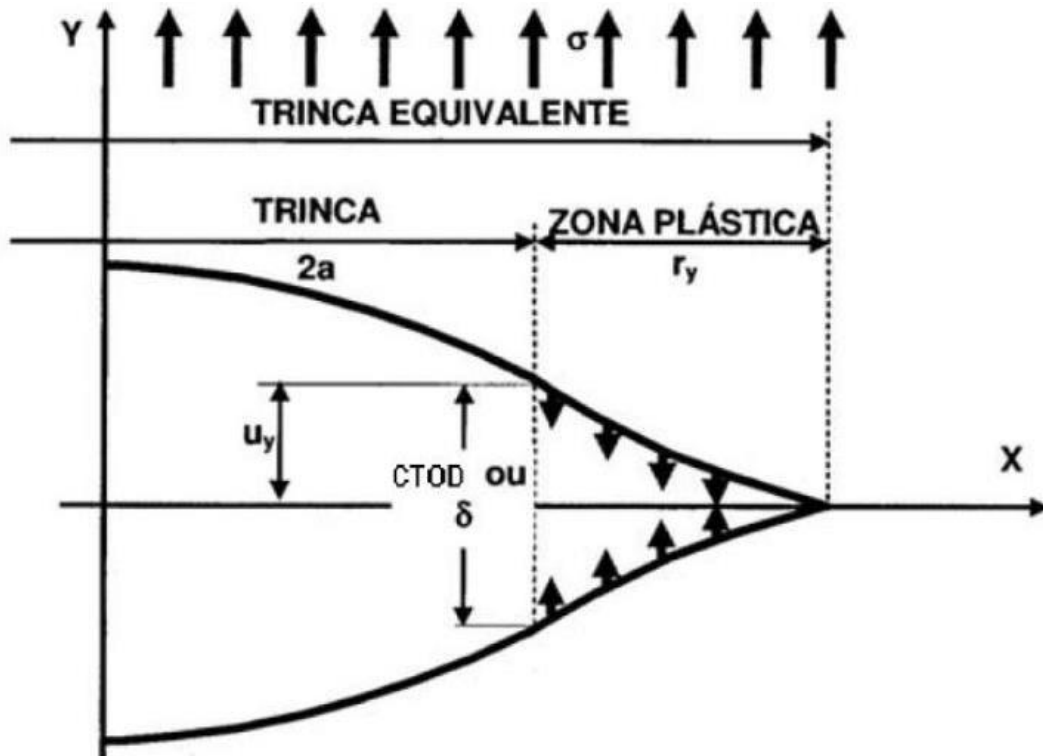
Desse modo, Wells avaliou que, para a condição de pequenas deformações, a ponta da trinca apresenta um comprimento acrescido de  $r_y$ , devido à zona de plastificação conforme ilustrado na Figura 8.

Utilizando a relação de Irwin para a correção da zona plastificada empregada, no estado plano de tensões, para pequenas deformações (SSY – *Small Scale Yielding*), tem-se:



$$\delta = \frac{4}{\pi} \frac{K_I^2}{\sigma_{YS} E} \quad (8)$$

**Figura 8** – Esquema da zona de plastificação na ponta de uma trinca.



Fonte: (MACHADO, 2011).

O parâmetro integral J foi desenvolvido por Rice (1968) para caracterizar o campo de tensão-deformação na vizinhança da ponta de uma trinca. Esse parâmetro é o resultado da integral de contorno, independentemente do caminho  $\Gamma$ , que determina a taxa de liberação de energia para um material com comportamento elastoplástico. A Figura 9 ilustra o esboço do conceito da integral J. A equação 9 apresenta a formulação para o cálculo de J.

$$J = \oint_{\Gamma} \left( w \cdot dy - \vec{T} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \cdot ds \right). \quad (9)$$

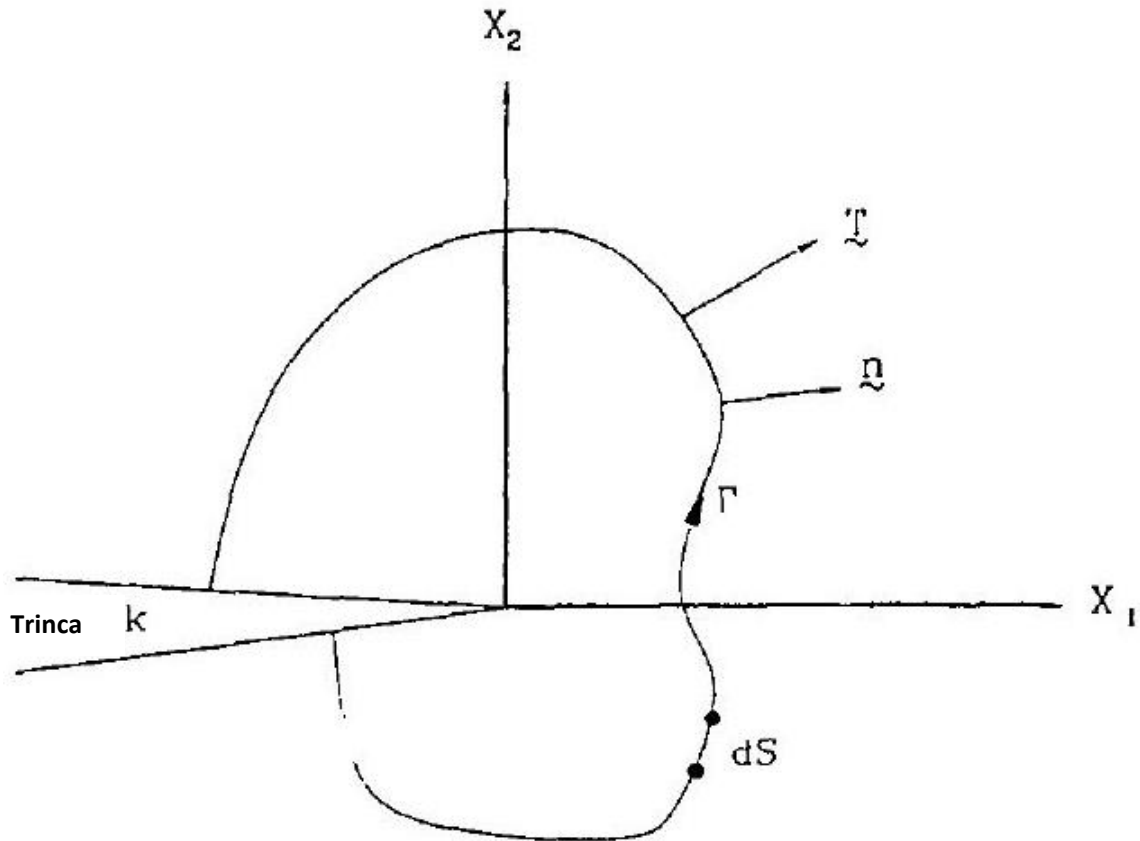
$\Gamma$  é o caminho que contorna a extremidade da trinca, independentemente do sentido;  $w$  é a densidade de energia de deformação;  $\vec{T}$  é o vetor tração;  $\vec{u}$  é o vetor deslocamento;  $ds$  é o incremento de comprimento ao longo do caminho do contorno.

Já a densidade de energia é definida como:

$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij}. \quad (10)$$

Em que  $\sigma_{ij}$  é o tensor de tensão e  $\varepsilon_{ij}$  é o tensor de deformação.

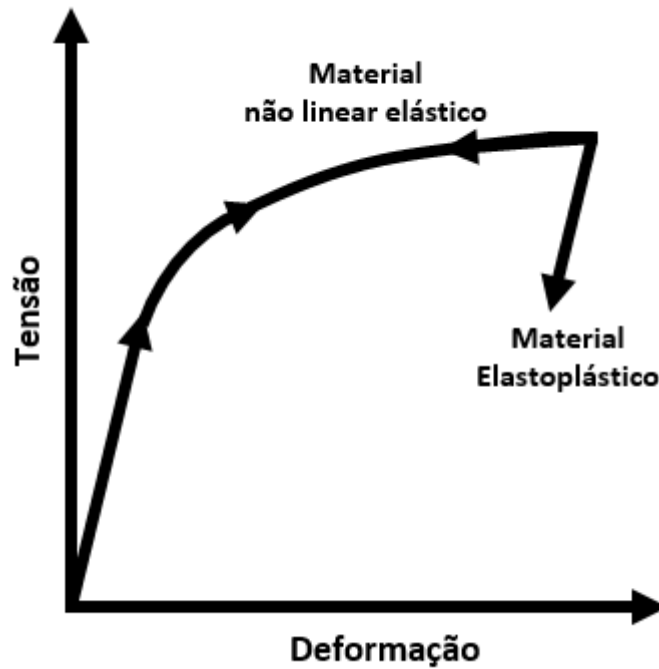
**Figura 9** – Contorno na região da ponta de uma trinca para determinar a integral J.



Fonte: (SAXENA, 1998). Adaptado pelo autor.

A interpretação de Rice se baseia na premissa que simplifica o comportamento de materiais elastoplástico como não-linear elástico sem o efeito do descarregamento conforme Figura 10. Assim, se uma região afastada da ponta da trinca possui um comportamento linear elástico, é possível a partir da sua curva de comportamento, inferir o campo de tensão-deformação em uma região na vizinhança da ponta da trinca que possui um comportamento não-linear elástico. Essa premissa então relaciona a Mecânica da Fratura Linear Elástica, onde o comportamento elástico é avaliado, com a Mecânica da Fratura Elastoplástica, onde é avaliada a plastificação no regime SSY na proximidade da ponta da trinca (BARSOM; ROLFE, 1999).

**Figura 10** – Comparação entre materiais com comportamento elastoplástico e não-linear elástico.



Fonte: (SAXENA, 1998).

A primeira padronização para determinação do K e J foi desenvolvida pelo ASTM em 1970 e 1981, respectivamente, enquanto o BSI publicou a primeira padronização para o CTOD em 1979.

Hoje existem algumas normas reconhecidas para execução dos ensaios de determinação da Tenacidade à Fratura, com destaque para as publicações das seguintes entidades:

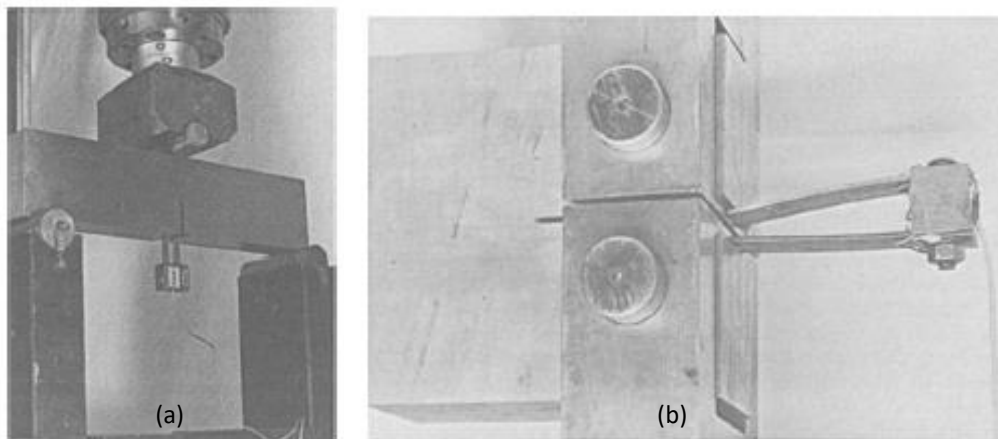
- a) *American Society for Testing and Materials (ASTM)*;
- b) *British Standards Institution (BSI)*;
- c) *International Organization for Standardization (ISO)*;
- d) *Japan Society of Mechanical Engineers (JSME)*;

Neste trabalho, é abordada apenas a metodologia utilizada pela ASTM, sendo essa a mais empregada mundialmente, cuja diferença, em relação as demais entidades apresentadas, são mínimas, conforme mencionado por Anderson (2005).

## 2.2.2 Ensaio de tenacidade à fratura

O ensaio para determinação da tenacidade à fratura de um material é basicamente o mesmo para os parâmetros utilizados na MFLE e na MFEP, com alguns ajustes específicos. Em ambos, são utilizados corpos de prova entalhados por usinagem, com posterior nucleação de trinca por fadiga. Esses ensaios são conduzidos em máquinas universais de tração ou flexão, a depender do tipo de corpo de prova. Uma instrumentação é utilizada para a aquisição de dados e posterior construção das curvas características do ensaio. A Figura 11 ilustra os dois tipos de corpos de prova mais utilizados no ensaio de tenacidade à fratura: SE(B) e C(T). O corpo de prova SE(B) está submetido ao esforço de flexão, já o corpo de prova C(T), ao esforço de tração, sendo ambos monitorados por um extensômetro para determinação do valor de abertura das superfícies do corpo de prova.

**Figura 11** – Esquema do ensaio de tenacidade à fratura para os corpos de prova SE(B) e C(T).



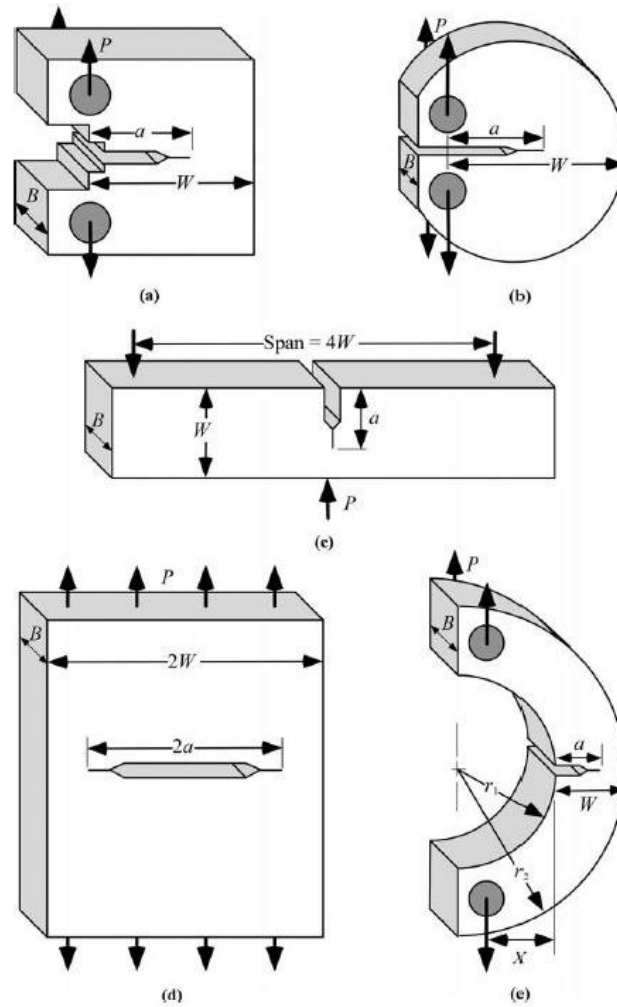
Fonte: (BARSOM; ROLFE, 1999). Adaptado pelo autor. (a) Corpo de prova de flexão em três pontos SE(B); (b) Corpo de prova compacto em tração C(T).

A Figura 12 ilustra os demais tipos de corpos de prova utilizados nos ensaios para levantamento da tenacidade à fratura do material. Nos cinco tipos de geometria, há três dimensões que são características: Comprimento da trinca (a); Largura (B) e Espessura (W) do corpo de prova.

Já a Figura 13 ilustra a relação de proporcionalidade geométrica entre os corpos de prova compactos, C(T), e flexão em três pontos, SE(B), para a mesma espessura B. O volume de material utilizado para a confecção do corpo de prova de flexão em três pontos é

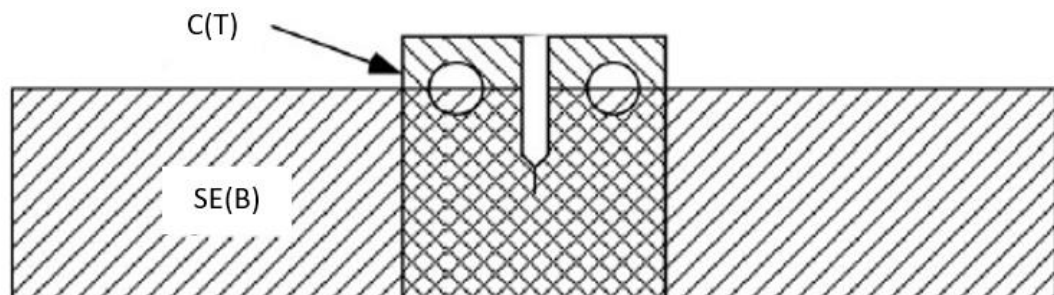
aproximadamente 3,0 vezes maior do que o volume necessário para a confecção do corpo de prova Compacto.

**Figura 12** – Corpos de prova para ensaio de tenacidade.



Fonte: (ANDERSON, 2005). Adaptado pelo autor. a) Compacto - C(T); b) Disco compacto - DC(T); c) Flexão em três pontos - SE(B); d) Tensão média - (MT); e) Curvado - A(T).

**Figura 13** – Comparação entre as proporções geométricas dos corpos de prova SE(B) – Flexão em três pontos e C(T) Compacto.



Fonte: (ANDERSON, 2005). Adaptado pelo autor.

Como a tenacidade à fratura é uma propriedade do material que depende da espessura do corpo de prova, pois a tenacidade depende do estado de tensão na ponta da trinca e as dimensões influenciam no estado de tensão. A utilização de corpos de prova com dimensões menores do que as configurações apresentadas pelas normas vigentes é inviável. Essa condição pode ser compreendida quando analisada a relação entre a tenacidade e as dimensões do corpo de prova:

a) Mecânica da Fratura Linear elástica (MFLE):

-  $K$  – Fator de intensidade de tensão;

$$B, a \geq 2,5(K_{IC}/\sigma_{YS})^2. \quad (11)$$

O parâmetro  $K_{IC}$  corresponde à tenacidade à fratura para materiais com comportamento frágil, em modo I de sollicitação, no estado plano de deformações;

b) Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP):

-  $J$  – Integral J;

$$B, b \geq 25(J_{IC}/\sigma_{YS}). \quad (12)$$

O parâmetro  $J_{IC}$  corresponde à tenacidade à fratura para materiais com comportamento dúctil, em modo I de sollicitação, no estado plano de deformações, no qual  $b$  corresponde à dimensão da largura do corpo de prova sem fratura.

Antes do desenvolvimento dos conceitos de Mecânica da Fratura, o ensaio amplamente utilizado para a avaliação da tenacidade dos metais era o ensaio de impacto, o qual é apenas um indicador qualitativo da tenacidade do material.

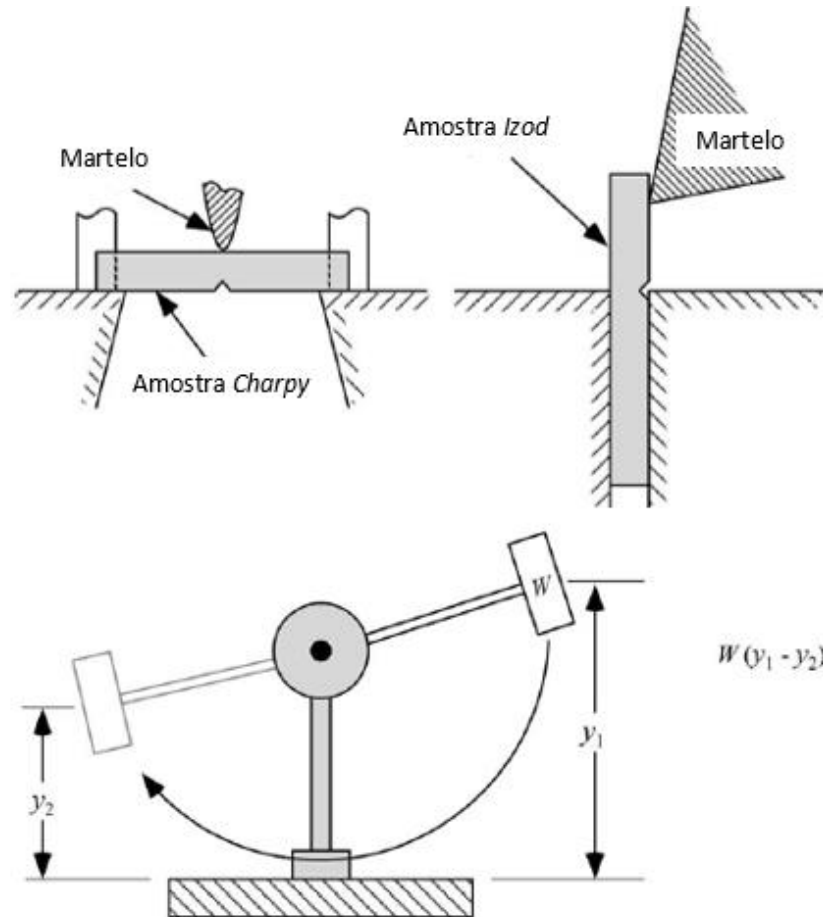
São utilizados dois métodos de ensaio para impacto: *Charpy* e *Izod*, sendo que apenas o primeiro será abordado no atual trabalho, pois o mesmo é largamente utilizado para estimar o valor de tenacidade à fratura dos metais.

### 2.2.3 Ensaio de Impacto Charpy

O ensaio de impacto *Charpy* consiste em golpear um corpo de prova entalhado com um martelo, que se desloca a partir de uma determinada altura, sendo realizada a leitura do valor

de energia absorvida pelo corpo de prova após o impacto em um mostrador geralmente analógico. A Figura 14 ilustra o esquema para a execução do teste de impacto.

**Figura 14** – Representação do ensaio de impacto.



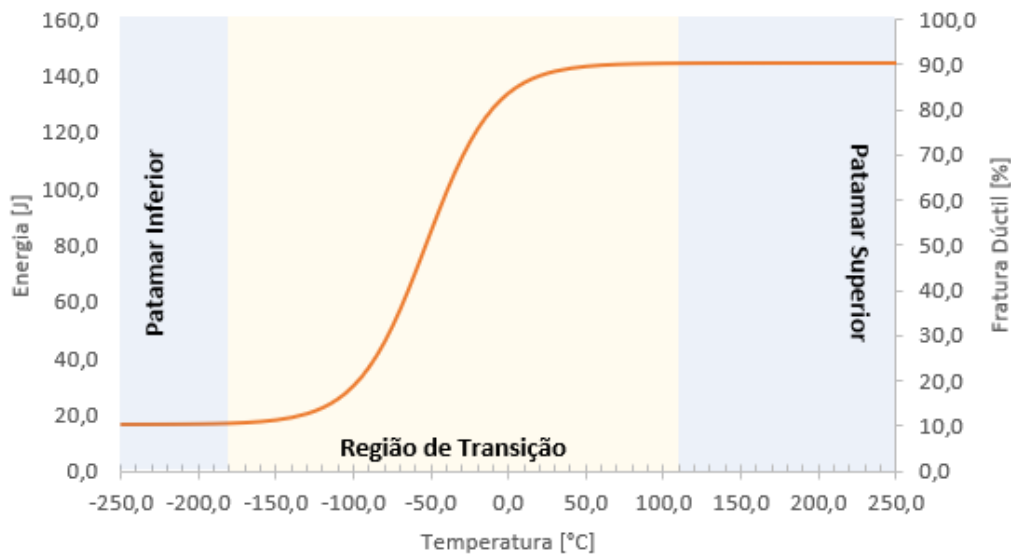
Fonte: (ANDERSON, 2005). Adaptado pelo autor.  $W$  é a energia absorvida pelo material.

A partir do valor de energia absorvida durante o teste para diferentes temperaturas, é construída a curva de temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF), como ilustrada na Figura 15. A TTDF possui três regiões – a depender do nível de energia absorvida pelo corpo de prova após ensaiado:

- a) Patamar inferior: Baixo nível de energia absorvida. O corpo de prova apresenta modo de fratura frágil;
- b) Patamar Superior: Alto nível de energia absorvida. O corpo de prova apresenta modo de fratura dúctil;

- c) Região de transição: Valor de energia entre os patamares superior e inferior. O corpo de prova apresenta modo de fratura misto entre dúctil e frágil, a depender da temperatura de teste.

**Figura 15** – Representação da curva de temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) para o ensaio de impacto.



Fonte: O autor.

Para efetuar o ajuste dos dados e construir a curva TTDF, utiliza-se a expressão da tangente hiperbólica. O método da tangente hiperbólica foi inicialmente proposto no relatório EPRI-NP-2428, emitido pela *Electric Power Research Institute* dos EUA (OLDFIELD et al., 1982). Esse procedimento é amplamente utilizado para ajuste de curva para o ensaio de impacto (ERICKSONKIRK et al., 2009; JOHN, 1998; LONG, 2013; SHAIKH; ERICKSONKIRK, 2008; SHIN; PARK; LEE, 2008).

O ajuste é realizado a partir da equação:

$$Y = A + B \cdot \tanh\{(T - D)/C\}, \quad (13)$$

Na qual:

$Y$  = É a variável a ser ajustada, neste caso, o valor de energia de impacto;

$A$  = É a média dos valores de  $Y$  para o patamar superior ( $Y_{US}$ ) e inferior ( $Y_{LS}$ );

$B$  = É a metade da diferença dos valores de  $Y$  para o patamar superior ( $Y_{US}$ ) e inferior ( $Y_{LS}$ );

$T$  = É a temperatura de teste;

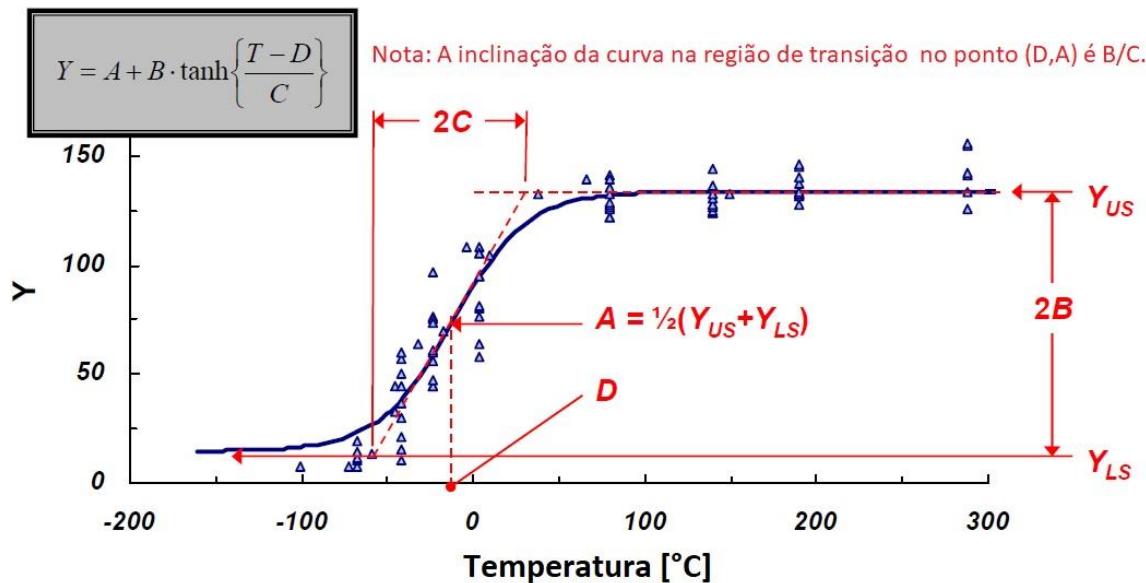


$D$  = É a temperatura em que  $Y=A$ ;

$C$  = É a metade da temperatura de transição entre o patamar superior ( $Y_{US}$ ) e inferior ( $Y_{LS}$ );

A Figura 16 ilustra um desenho esquemático para a identificação das variáveis.

**Figura 16** – Esquema para identificação das variáveis da função tangente hiperbólica para ajuste dos dados do ensaio de impacto.



Fonte: (SHAIKH; ERICKSONKIRK, 2008) Adaptado pelo autor.

Assim, o procedimento a ser utilizado consiste em:

- O valor de  $Y_{US}$  será a média dos valores encontrados, em que a face de fratura do corpo de prova apresenta uma área maior ou igual a 95% de fratura dúctil. Entre outras referências, utiliza-se a metodologia apresentada pelo ASTM E23 (ASTM, 2016b) para determinação do percentual de fratura;
- O valor de  $Y_{LS}$  será constante e igual a 2 Joules para todos os dados. É uma recomendação prática;
- $A = (Y_{LS} + Y_{US})/2$ ;
- $B = Y_{US} - A$ ;
- Uma vez determinado os valores de  $A$  e  $B$ , para encontrar os valores de  $C$  e  $D$ , utiliza-se o programa SOLVER, da planilha eletrônica (EXCEL) da Microsoft, com o algoritmo GRG 2 (Gradiente Reduzido Generalizado) para minimizar os erros quadrados, não linearmente.

Uma vez estabelecido os valores ajustados para A, B, C e D é possível estimar a temperatura de transição ( $T_{xx}$ ) e o patamar de energia superior ( $USE$ ) utilizando as seguintes expressões:

$$T_{xx} = C \cdot \tanh^{-1}\{(xx - A)/B\} + D \quad (14)$$

$$USE = A + B \quad (15)$$

Destaca-se na equação que o  $xx$  representa o índice de energia em Joules em que a temperatura de transição ( $T_{xx}$ ) é definida. O valor da energia de transição dúctil-frágil pode ser atribuído ao valor de energia média entre os patamares superior e inferior ajustados pela nova curva, correspondente ao ponto (D, A) da curva ilustrada na Figura 16.

Diversas pesquisas foram conduzidas para utilizar o resultado do ensaio de impacto *Charpy* como estimador da tenacidade à fratura do material, através de relações empíricas. As Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, apresentam algumas dessas relações, para temperatura ambiente, compilados por Terán et al. (2016).

**Tabela 1** – Correlação entre Impacto *Charpy* e Tenacidade à fratura  $K_{IC}$  para o patamar inferior de energia.

Região	Formula	Unidades	Limites	Referência	Equação
Patamar Inferior	$K_{IC} = 8,47(CVN)^{0,63}$	$MPa\sqrt{m}, J$		Robert e Newton	(16)
	$K_{IC} = 12\sqrt{CVN}$	$MPa\sqrt{m}, J$		INSTA	(17)

Fonte: (TERÁN et al., 2016) Adaptado pelo autor.  $CVN = Charpy V Notch$  (Energia absorvida no ensaio *Charpy*).

**Tabela 2** – Correlação entre Impacto Charpy e Tenacidade à fratura  $K_{IC}$  para o patamar superior de energia.

Região	Formula	Unidades	Limites	Refer.	Equação
Patamar Superior	$(K_{IC}/\sigma_{ys})^2 = 0,64(CVN/\sigma_{ys} - 0,01)$	$MPa\sqrt{m}, MPa, J$	$760 < \sigma_{ys} < 170 MPa$	Rolfe-	(18)
	$(K_{IC}/\sigma_{ys})^2 = 5(CVN/\sigma_{ys} - 0,05)$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$	$\sigma_{ys} > 689 MPa / \sigma_{ys} > 100 ksi$	Novak- Barson	(19)
	$(K_{IC}/\sigma_{ys})^2 = 0,54(CVN/\sigma_{ys} - 0,02)$	$MPa\sqrt{m}, MPa, J$			
	$(K_{IC}/\sigma_{ys})^2 = 4(CVN/\sigma_{ys} - 0,1)$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$		WRC 265	(20)
					(21)
	$(K_{IC}/\sigma_{ys})^2 = 5(CVN/\sigma_{ys} - 0,05)$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$	$1172 - 1344 MPa$	Sailors e Corten	(22)
			$170 - 195 ksi, 100 - 110 ft - lb$		
	$(K_{IC}/\sigma_{ys})^2 = 5/\sigma_{ys} (CVN - \sigma_{ys}/20)$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$	$110 - 246 ksi, 16 - 89 ft - lb$	Rolfe- Novak- Barson	(23)
			Robert e Newton	(24)	
	$K_{IC} = 0,804\sigma_{ys}(CVN/\sigma_{ys} - 0,0098)^{0,5}$	$MPa\sqrt{m}, MPa, J$			

Fonte: (TERÁN et al., 2016) Adaptado pelo autor.  $CVN = Charpy V Notch$  (Energia absorvida no ensaio *Charpy*).

**Tabela 3** – Correlação entre Impacto Charpy e Tenacidade à fratura KIC para a região de transição de energia.

Região	Formula	Unidades	Limites	Referência	Equação
Região de Transição	$K_{IC}^2/E = 2(CVN)^{3/2}$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$	40 – 250 $ksi$ , 4 – 82J	Barson e Rolfe	(25)
	$K_{IC} = 9,35(CVN)^{0,63}$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$		WRC 265	(26)
	$K_{IC} = 8,47(CVN)^{0,63}$	$MPa\sqrt{m}, MPa, J$			(27)
	$K_{IC} = 14,6(CVN)^{0,50}$	$MPa\sqrt{m}, MPa, J$	410 – 480 $MPa$ , 59 – 69 $ksi$	Sailors e Corten	(28)
	$K_{IC} = 15,5(CVN)^{0,50}$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$	5 – 50 $ft - lb$		(29)
	$K_{IC}^2/E = 8(CVN)$	$psi\sqrt{in}, psi, ft - lb$	268 – 923 $MPa$ , 39 – 134 $ksi$	Sailors e Corten	(30)
			5 – 50 $ft - lb$		
	$K_{IC} = 2,1(\sigma_{ys} \cdot CVN)^{1/2}$	$ksi\sqrt{in}, ksi, ft - lb$		Wullaert-Server	(31)
	$K_{IC} = 19(CVN)^{1/2}$	$MPa\sqrt{m}, MPa, J$	303 – 820 $MPa$ , 43 – 118 $ksi$	Marandet e Sanz	(32)

Fonte: (TERÁN et al., 2016) Adaptado pelo autor.  $CVN = Charpy V Notch$  (Energia absorvida no ensaio *Charpy*).

Contudo, o ensaio de impacto não reflete bem o valor de tenacidade à fratura dos metais – uma vez que o entalhe do corpo de prova não representa bem a geometria de uma trinca. Além disso, o tamanho do corpo de prova não produz uma restrição que seja compatível com o estado de tensão de uma estrutura real e a força de ativação é através de uma carga de impacto. Enquanto isso, em um ensaio convencional de tenacidade à fratura, a carga é aplicada em uma condição quase estática (ANDERSON, 2005), além de necessitar de amostras com dimensões significativamente grandes para a confecção dos corpos de prova.

Dessa forma, são observados alguns inconvenientes nos ensaios convencionais para determinação das características mecânicas de resistência e tenacidade à fratura dos materiais metálicos:

- a) Requer um grande volume de material para a confecção dos corpos de prova para teste, seja com as dimensões da amostra padrão ou reduzida para o ensaio de tração, seja com as dimensões da amostra para o ensaio de tenacidade à fratura ou de impacto Charpy;
- b) Para equipamentos em serviço, faz-se necessário o reparo da região onde foi removido o material para a confecção dos corpos de prova para teste;
- c) Limitações na determinação das propriedades mecânicas para caracterização do material em regiões específicas do equipamento, como por exemplo, na zona afetada termicamente em juntas soldadas.

Sendo assim, a necessidade de um ensaio alternativo para determinar as propriedades mecânicas dos metais levou a engenharia a desenvolver estudos com corpos de prova miniaturizados e que fossem representativos do problema real de estruturas. Com esses estudos, surge o ensaio miniaturizado por penetração conhecido como SPT (*Small Punch Test*), o qual será apresentado detalhadamente no próximo capítulo.

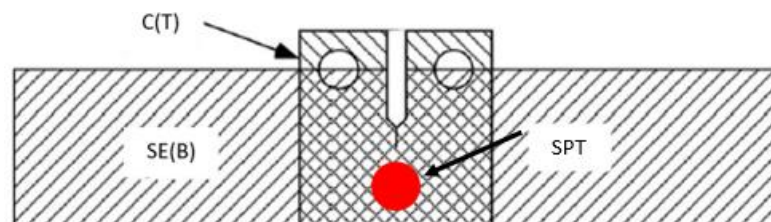
### 3 ENSAIO MINIATURIZADO POR PENETRAÇÃO

O *Small Punch Test* (SPT) se destaca como uma alternativa promissora para a avaliação das características mecânicas de metais (HASHMI, 2014). O método SPT pode ser utilizado para a determinação das seguintes propriedades mecânicas, em um estado biaxial de tensão:

- a) Tenacidade à fratura dúctil;
- b) Tenacidade à fratura frágil;
- c) Limite de resistência à tração;
- d) Limite de escoamento;
- e) Módulo de elasticidade;
- f) Módulo de resiliência;
- g) Módulo de tenacidade;
- h) Coeficiente de encruamento;
- i) Coeficiente de resistência;
- j) Resistência à Fluência;
- k) Temperatura de transição dúctil-frágil;

Alguns autores (ASTM, 2002; HÜTTER; ZYBELL, 2016; KARTHIK; KASIVISWANATHAN; RAJ, 2016) consideram esse método de ensaio como não destrutivo, uma vez que a quantidade de material requerido para confecção do corpo de prova é mínima e não necessita de reparo após a sua remoção. A Figura 17 ilustra a proporção do volume de material necessário para um corpo de prova utilizado no ensaio SPT, o corpo de prova Compacto, C(T), Flexão em três pontos e SE(B), utilizados em ensaios convencionais para a determinação da tenacidade à fratura. O volume necessário para a confecção do corpo de prova para o ensaio SPT equivale a menos de 1% do volume dos outros dois corpos de prova.

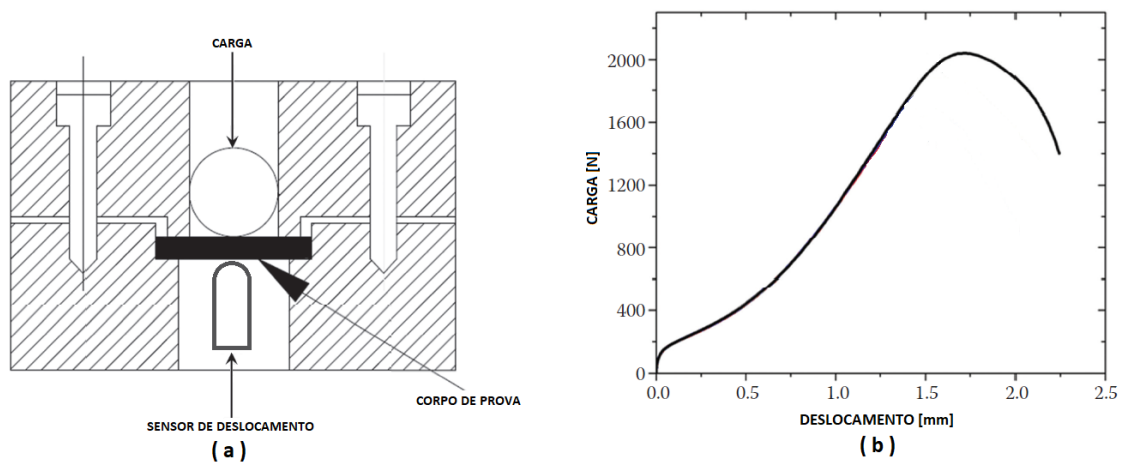
**Figura 17** – Comparação entre as proporções geométricas dos corpos de prova SE(B) – Flexão em três pontos, C(T) – Compacto SPT – Small Punch Test.



Fonte: (ANDERSON, 2005) Adaptado pelo autor.

O ensaio SPT consiste na penetração de um corpo de prova miniaturizado, por uma haste de ponta esférica ou por uma esfera metálica, cujo deslocamento e carga aplicada são monitorados para a elaboração da curva carga-deflexão (deslocamento da amostra) ou carga-deslocamento (deslocamento do penetrador), a depender da escolha do local para aquisição dos dados de deslocamento. O corpo de prova pode estar simplesmente apoiado (livre), ou engastado (fixo). A Figura 18 ilustra o esquema do dispositivo para a execução do ensaio SPT e a curva resposta característica do ensaio.

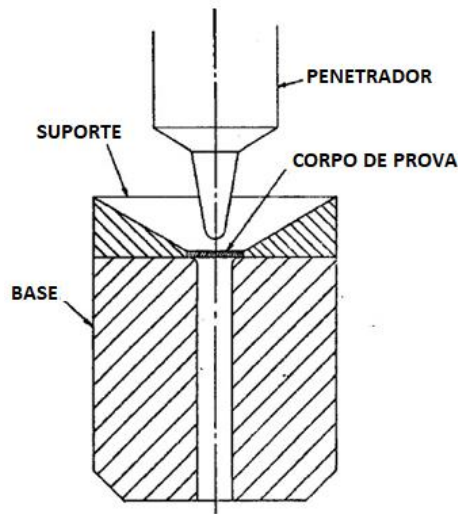
**Figura 18** – Esquema do ensaio SPT.



Fonte: (KARTHIK; KASIVISWANATHAN; RAJ, 2016). Adaptado pelo autor. (a) Dispositivo de teste com corpo de prova e acessórios; (b) Curva carga-deflexão típica do ensaio.

O método SPT teve seu início e desenvolvimento na década de 1980 com estudos nos EUA pelo MIT para avaliação de fragilização por radiação na área nuclear (MANAHAN; ARGON; HARLING, 1981). Manahan, que nesse trabalho denominava o método como MDBT (*Miniaturized Disk Bend Test*), teve, como objetivo, demonstrar a resposta do SPT para a representação da curva tensão-deformação em estado biaxial de sollicitação para materiais metálicos, e, com a ajuda do método de elementos finitos, tratar os dados obtidos para a aplicação em engenharia. Foram utilizados discos, simplesmente apoiados, com dimensões de 3,0 mm x 0,25 mm para dez aços diferentes, entre eles, liga de BeCu, 302SS e 316SS, em diferentes condições de carregamento e de temperatura. A Figura 19 ilustra o arranjo utilizado para o teste:

**Figura 19** – Esquema do dispositivo para o Ensaio MDBT.



Fonte: MANAHAN; ARGON; HARLING, 1981. Adaptado pelo autor.

Apesar das limitações computacionais da época, pois era necessário desenvolver um modelo para melhorar a representação da condição de contato de fricção durante o ensaio, foram obtidos bons resultados que demonstraram que o ensaio poderia ser utilizado para determinar o comportamento elastoplástico dos materiais sob estudo. Uma observação que se destacou para a padronização do ensaio foi o tamanho do raio do penetrador a ser utilizado. Nesses experimentos foram utilizados os raios de 0,762 mm e 0,508 mm. O penetrador com raio de 0,508 mm apresentou uma curva tensão-deformação com valores menores, além de que houve o aprisionamento do corpo de prova ao penetrador após o teste, devido à severidade com que a curvatura do corpo de prova foi modificada.

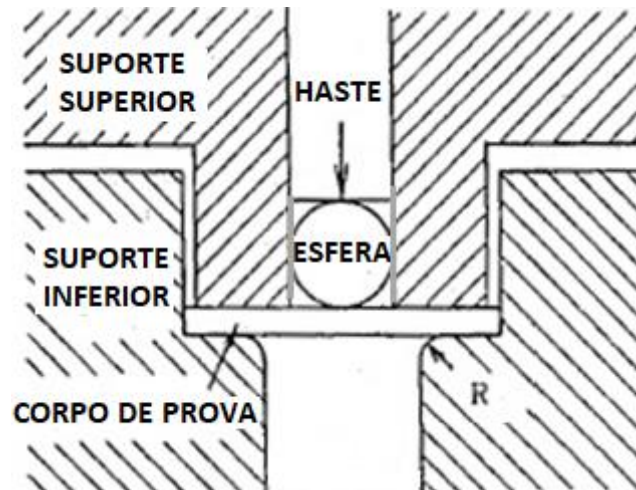
Na sequência, o Japão realizou novos estudos na área nuclear, incluindo a primeira publicação para a padronização do ensaio (MAO; TAKAHASHI, 1987; TAKAHASHI et al., 1988). Takahashi apresentou uma proposta para padronizar o ensaio com o objetivo de determinar a temperatura de transição dúctil-frágil e a tenacidade à fratura elastoplástica, usando o ensaio SPT. Foram utilizados três tipos de corpos de prova: um prisma de 10 mm x 10 mm x 0,5 mm e um de 10 mm x 10 mm x 0,25 mm, com os seguintes materiais: A508, HT-9, 9CR, Cu-Be-Co, A533B, 2 ¼ Cr 1Mo; e um disco de 3,0 mm x 0,25 mm, com os seguintes materiais: PCA, HT-9, 9CR, Cu-Be-Co, A533B. Foram utilizados dois raios de penetrador: 1,2 mm e 0,5 mm. Os corpos de prova foram testados em quatro temperaturas: -195°C; -91°C; -80°C; -52°C.

A Figura 20 ilustra um desenho esquemático do dispositivo utilizado por Takahashi. Essa configuração apresenta um projeto diferente do utilizado por Manahan. Nesse, o corpo de



prova está fixo entre duas placas suportes, é utilizado um guia para o penetrador (conjunto haste e esfera) e foi inserido um raio de concordância no suporte inferior na borda do furo interno.

**Figura 20** – Esquema do dispositivo para o Ensaio SPT Takahashi.



Fonte: TAKAHASHI et al., 1988. Adaptado pelo autor.

Na década de 1990, novos trabalhos promoveram importantes avanços para o ensaio miniaturizado por penetração. Mao, Saito e Takahashi (1991) apresentaram um refinamento dos valores de tenacidade à fratura, com o uso de novos coeficientes de ajuste para a relação linear entre os valores de deformação efetiva e integral  $J$ , em um estudo que realizaram com materiais de comportamento dúctil (HT-9, A533B, 9Cr-2Mo, A508, Cu-Be-Co) e frágil (SiC,  $Y_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ , dentre outros).

Foulds e Viswanathan (1996) pesquisaram a correlação entre os resultados do ensaio SPT e o resultado do ensaio padronizado para a determinação do valor de  $K_{IC}$  para seis materiais distintos, encontrando uma dispersão de  $\pm 25,0\%$  para o valor de tenacidade à fratura.

Ha e Fleury (1998) apresentaram uma relação com base no ensaio SPT, para determinarem os valores de  $K_{IC}$  e  $J_{IC}$ , derivados dos dados encontrados em ensaios de impacto Charpy. Os resultados, quando comparados, são considerados como uma boa estimativa para a tenacidade do material, conforme mencionado por Hashmi (2014).

Abendroth e Kuna (2004) desenvolveram uma rede neural que foi treinada por simulações do ensaio SPT através do método de elementos finitos, sendo seu resultado otimizado a partir dos dados extraídos dos ensaios SPT dos aços 18Ch2MFA (WVER 440), 22NiMoCr37, StE-690, GGG-40 em corpo de prova circular de 8,0 mm x 0,5 mm, na condição engastada. Os resultados do ensaio SPT foram comparados com os valores obtidos de ensaios convencionais de tração em corpo de prova cilíndrico com entalhe central. Seu trabalho

demonstrou que, com a utilização de uma rede neural, é possível estabelecer uma relação constitutiva, determinando os parâmetros de encruamento, do material e que se consegue, numericamente, determinar os valores de tenacidade à fratura com sucesso, a partir dos resultados do ensaio SPT.

Baseado em todos os resultados já publicados, mostrando o potencial da utilização do ensaio SPT, em 2007 a comunidade Europeia formulou o documento CEN CWA 15627 (CEN, 2007) a ser utilizado como um guia para a execução do ensaio SPT para avaliação da resistência à fluência, resistência mecânica à tração e tenacidade à fratura. Esse guia é um compilado de todas as boas práticas e dados revelados em pesquisas publicadas até então, sendo as principais expostas nos parágrafos acima, tornando-se um documento de referência para a execução do teste e para a comparação de resultados entre pesquisadores.

O ANEXO A – METODOLOGIA PARA O ENSAIO SPT CONFORME CWA 15627 apresenta uma descrição completa do método de ensaio, requisitos necessários, registro e tratamento de dados.

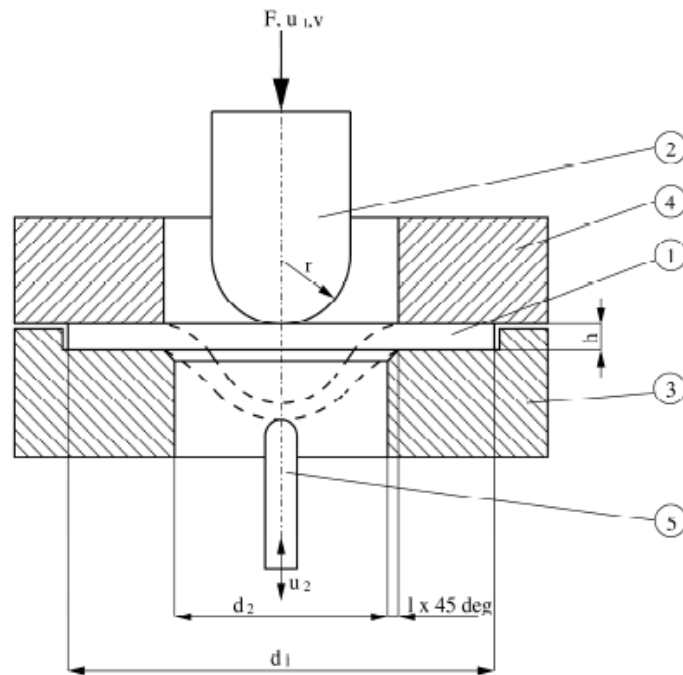
Focado nos objetivos deste trabalho, a seguir, é detalhada a metodologia para a determinação das propriedades mecânicas de resistência e de tenacidade à fratura, a partir da interpretação dos resultados do ensaio SPT, com base no procedimento de teste do guia europeu CWA 15627:2007 e em suas referências, apresentando os pontos de atenção demonstrados por pesquisas realizadas após a sua publicação.

### 3.1 EXECUÇÃO DO ENSAIO SPT E TRATAMENTO DOS RESULTADOS

#### *Dispositivo de Teste*

O dispositivo de teste para o ensaio SPT é ilustrado conforme a Figura 21, com o penetrador, sedes, medidor de deflexão e o corpo de prova.

**Figura 21** – Dispositivo de teste para ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007) Adaptado pelo autor. 1 – Corpo de prova, 2 – Penetrador, 3 – Sede inferior, 4 – Sede de fixação, 5 – Medidor de deflexão.

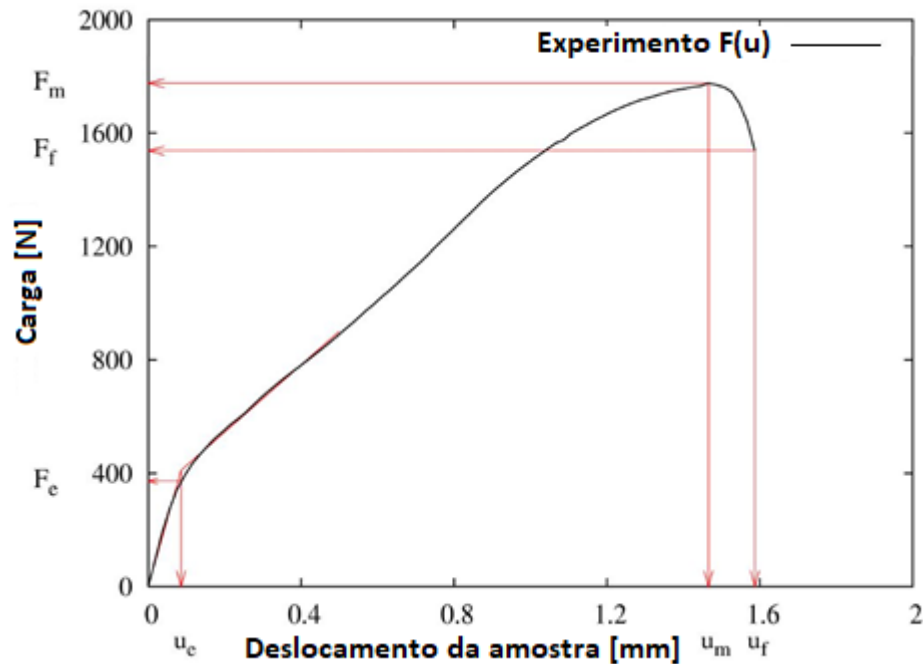
O dispositivo de teste deve ter um penetrador esférico capaz de forçar a parte central do corpo de prova, através do furo da sede inferior até a conclusão do ensaio.

O dispositivo de teste pode ser usado em duas configurações: a primeira com o corpo de prova engastado, em que este está fixo através de união aparafusada entre a sede superior e a inferior, de modo a não permitir qualquer deslocamento do perímetro do corpo de prova durante o teste; e a segunda com o corpo de prova livre, de tal forma que esse encontra-se solto entre a sede superior e inferior, estando essas duas sedes simplesmente apoiadas, de modo a permitir o deslocamento do perímetro do corpo de prova durante o teste.

### *Registro do Teste*

A Figura 22 ilustra a curva carga aplicada vs. deflexão (deslocamento transversal do ponto central) para o ensaio SPT.

**Figura 22** – Representação da curva carga-deflexão durante o ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007). Adaptado pelo autor.

Sendo que:

$F_m$  [N] = Carga máxima registrada durante o ensaio SPT;

$u_m$  [mm] = Deslocamento correspondente a carga  $F_m$ ;

$F_f$  [N] = Carga corresponde ao início da fratura registrada durante o ensaio SPT;

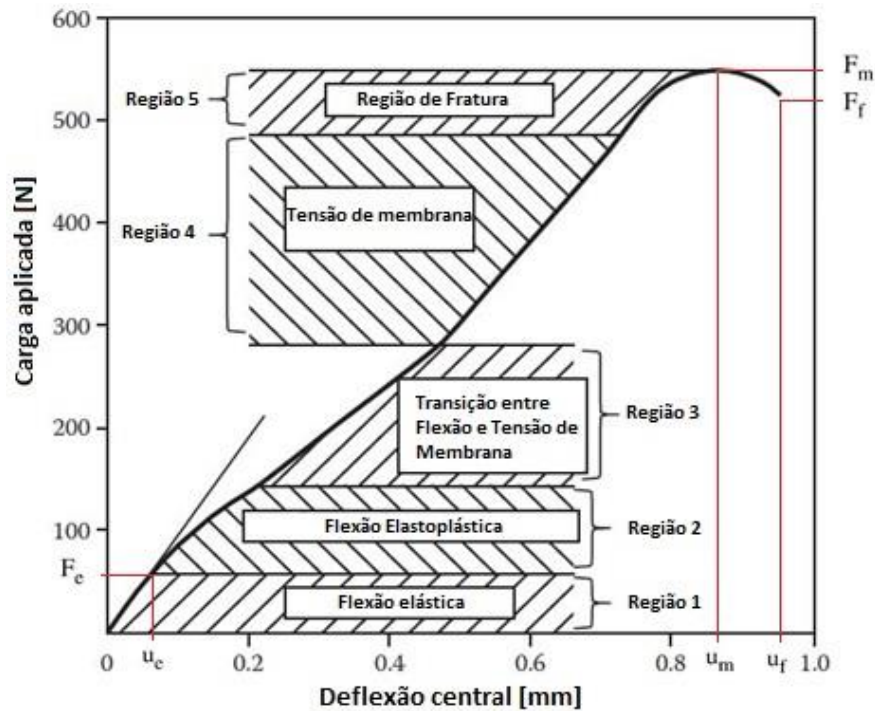
$u_f$  [mm] = Deslocamento correspondente a carga  $F_f$ ;

$F_e$  [N] = Carga que caracteriza a transição da linearidade elástica para a plasticidade, devido à flexão durante o ensaio SPT;

$u_e$  [mm] = Deslocamento correspondente a carga  $F_e$ ;

Inicialmente, faz-se necessário entender o comportamento mecânico do corpo de prova durante o ensaio SPT para a utilização dos dados da curva carga-deflexão. A Figura 23 ilustra a condição que o corpo de prova está submetido a cada incremento de deslocamento do penetrador, para um material dúctil.

**Figura 23** – Comportamento do corpo de prova durante o ensaio SPT.



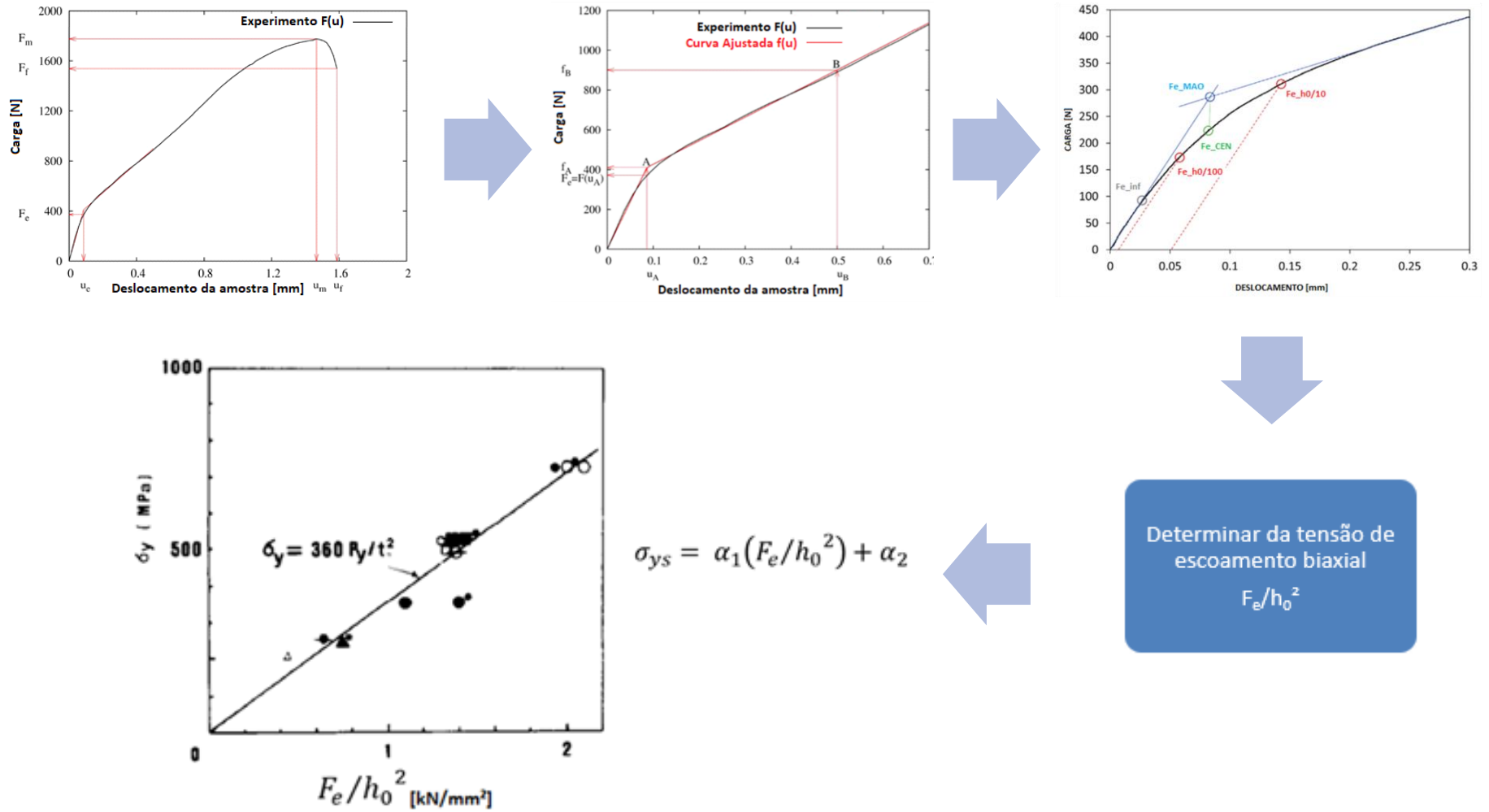
Fonte: (KARTHIK; KASIVISWANATHAN; RAJ, 2016) Adaptado pelo autor.

A região 1 mostrada na Figura 23 é regida pela deformação elástica do material, na qual é possível identificar a inclinação da reta que determina o módulo de elasticidade do material. A partir da região 2, é revelada a influência da deformação plástica originada pela tensão de flexão do corpo de prova. Na região 3, a deformação plástica continua a progredir no corpo de prova com a transição gradual entre a tensão de flexão e a tensão de membrana. A região 4 é por sua vez caracterizada pela deformação plástica imposta apenas pela tensão de membrana. E, por fim, na região 5, é onde ocorre a fratura do material. Para materiais que apresentam baixa ductilidade, a extensão das regiões 4 e 5 podem ser reduzidas e, em alguns casos, inexistir (LUCON, 2014).

#### *Determinação da tensão de escoamento*

O fluxograma ilustrado na Figura 24 apresenta as principais etapas para a determinação da tensão de escoamento convencional, obtida por ensaio de tração uniaxial, através dos parâmetros observados no ensaio SPT. Na sequência é abordado em detalhe a metodologia para cada parâmetro de teste.

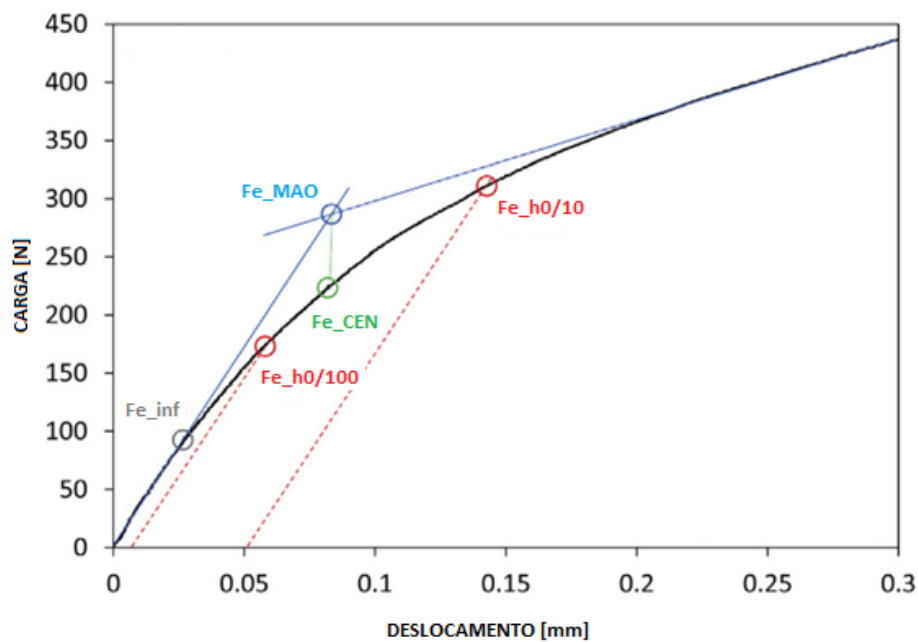
Figura 24 – Fluxograma das etapas para determinação da tensão de escoamento através do ensaio SPT.



Fonte: O autor.

A carga  $F_e$  e sua deformação equivalente  $u_e$  caracterizam a transição da linearidade elástica para a não linearidade plástica, devido à flexão durante o ensaio SPT, e estão relacionadas com a tensão de escoamento obtida no ensaio convencional de tração. Várias metodologias foram apresentadas por diferentes pesquisadores para a determinação da carga  $F_e$ . A Figura 25 ilustra as principais abordagens sugeridas até o momento.

**Figura 25** – Representação das diferentes abordagens para determinação da carga  $F_e$ .

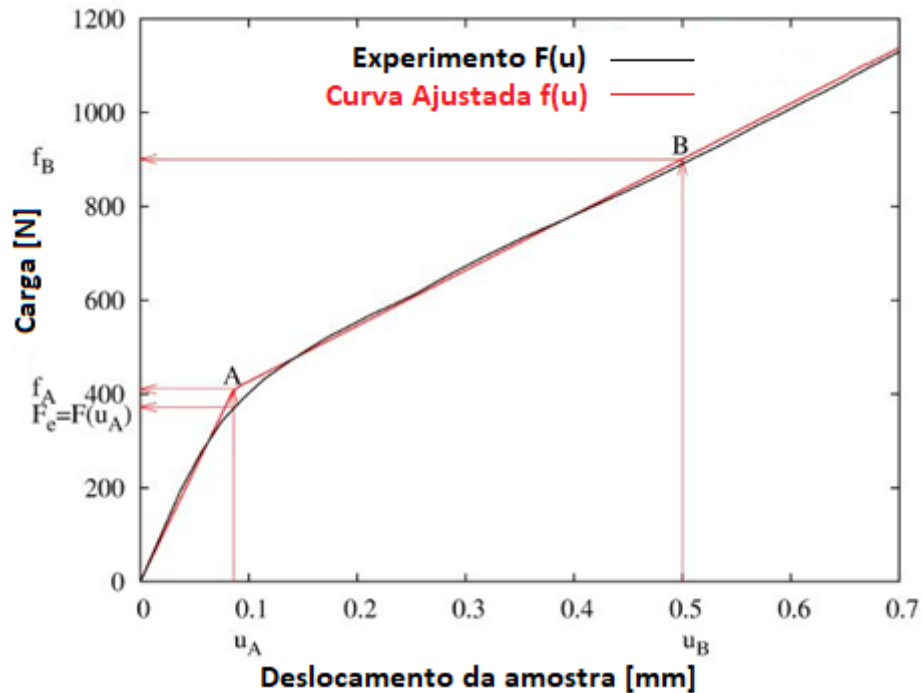


Fonte: (GARCÍA et al., 2014). Adaptado pelo autor.

Inicialmente, Mao e Takahashi (1987) sugeriram que a carga  $F_e$  ( $F_{e\_MAO}$ ) seria o valor da interseção entre a reta de ajuste dos pontos relacionado à região 1 e 2, identificada na Figura 23.

Todavia, esse método foi questionado, pois o mesmo utiliza um valor de carga fora da curva do material. Assim, o guia europeu CWA 15627:2007 (CEN, 2007) modificou o método de Mao, utilizando como valor da carga  $F_e$  ( $F_{e\_CEN}$ ), a projeção vertical sobre a curva do material, do ponto de interseção entre as retas de ajuste da região 1 e 2 da curva do material, como ilustrado na Figura 23. Dessa forma, é elaborada a curva bilinear ajustada do ensaio, conforme apresentada na Figura 26, para determinar o valor de  $F_e$ .

**Figura 26** – Representação da curva carga-deflexão ajustada após o ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007). Adaptado pelo autor.

A curva  $F(u)$  representa os dados coletados durante o ensaio SPT.

A curva  $f(u)$  representa uma função bilinear da origem até os pontos A e B, conforme a seguinte formulação:

$$f(u) = \frac{f_A}{u_A} u \quad \text{para } 0 \leq u \leq u_A. \quad (33)$$

$$f(u) = \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A \quad \text{para } u_A \leq u \leq u_B.$$

Para encontrar os parâmetros da curva bilinear, deve-se minimizar o erro dado por:

$$err = \int_0^{u_B} [F(u) - f(u)]^2 du. \quad (34)$$

A curva  $f(u)$  então é obtida pelo melhor ajuste, variando os valores de  $u_A$ ,  $f_A$  e  $f_B$ , utilizando-se o método dos mínimos quadrados para compensar o erro.

A função  $f(u_A)$  é a reta de ajuste dos pontos da origem até o ponto A do gráfico ilustrado na Figura 26 e que está relacionada com a região 1, identificada na Figura 23 como governada pela deformação elástica. Nesse trecho, é possível identificar a inclinação da reta que determina o módulo de elasticidade do material. Já a função  $f(u_B)$  é a reta de ajuste dos pontos contidos no



intervalo entre o ponto A e B do gráfico, apresentado na Figura 26, e que representa a transição para a região de deformação plástica do material, conforme mostrado na Figura 23, região 2.

Após os devidos ajustes, é possível obter o valor do deslocamento  $u_e = u_A$  e o valor da carga  $F_e = F(u_A)$ . Para  $u_B$ , que é um parâmetro livre, o guia europeu CWA 15627:2007 sugere utilizar valores entre 0,3 e 0,5 mm para o patamar característico da curva de carga-deflexão; contudo, uma escolha recomendada por esse é que  $u_B = h_0$ , que é a espessura inicial do corpo de prova.

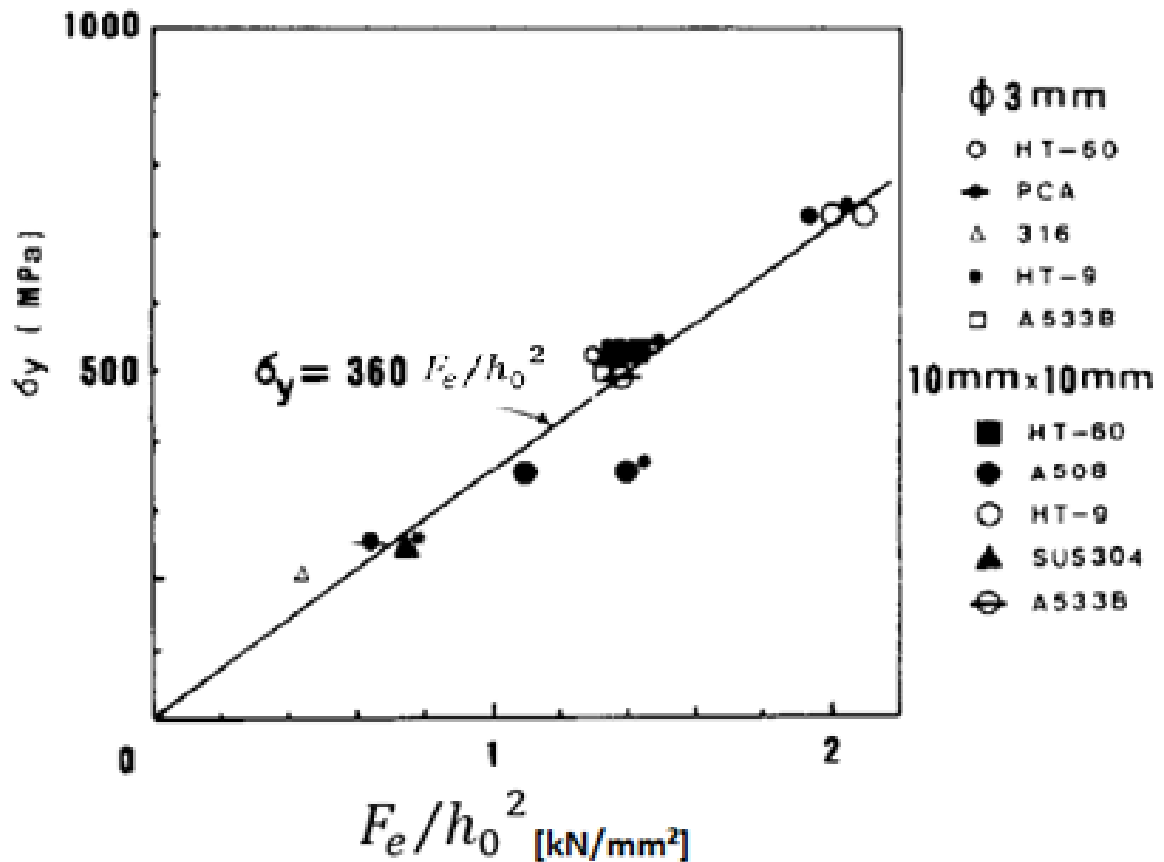
Outras propostas surgiram com o desenvolvimento do ensaio. Rodríguez et al. (2009) e Contreras et al. (2008) propuseram para o valor da carga  $F_e$  o ponto da interseção da reta paralela ao trecho reto da inclinação inicial da curva do material, com um deslocamento de um décimo ( $F_{e_{h_0/10}}$ ) e de um centésimo ( $F_{e_{h_0/100}}$ ) da espessura inicial ( $h_0$ ) do corpo de prova. Apesar de García et al. (2014) atribuir o parâmetro de carga  $F_{e_{h_0/100}}$  a Rodríguez e Contreras, esse não foi encontrado na publicação referenciada. Por fim, Lacalle et al. (2009) sugere a utilização do primeiro ponto de inflexão da curva do material para a determinação da carga  $F_e$  ( $F_{e_{inf}}$ ).

Uma vez determinada a carga  $F_e$ , a tensão de escoamento do material é obtida a partir de uma relação linear semi-empírica entre os resultados registrados pelo método SPT e pelo ensaio de tração convencional. Essa relação foi introduzido pelas observações de Mao (MAO; TAKAHASHI, 1987), ver Figura 27, e ratificada por outros trabalhos (KAMEDA, 1994; LUCAS, 1990; MAO; SAITO; TAKAHASHI, 1991), como sendo:

$$\sigma_{ys} = \alpha_1(F_e/h_0^2) + \alpha_2 \quad (35)$$

$\sigma_y$  [MPa] = Tensão de escoamento obtida através do ensaio convencional de tração;  $F_e$  [N] = Carga que caracteriza a transição da linearidade elástica para a plasticidade devido à flexão durante o ensaio SPT;  $h_0$  [mm] = Espessura inicial do corpo de prova;  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são os coeficientes determinados pelo ajuste entre os resultados registrados pelo ensaio convencional de tração e o ensaio SPT.

Figura 27 – Relação entre a carga  $F_e$  e a tensão de escoamento.



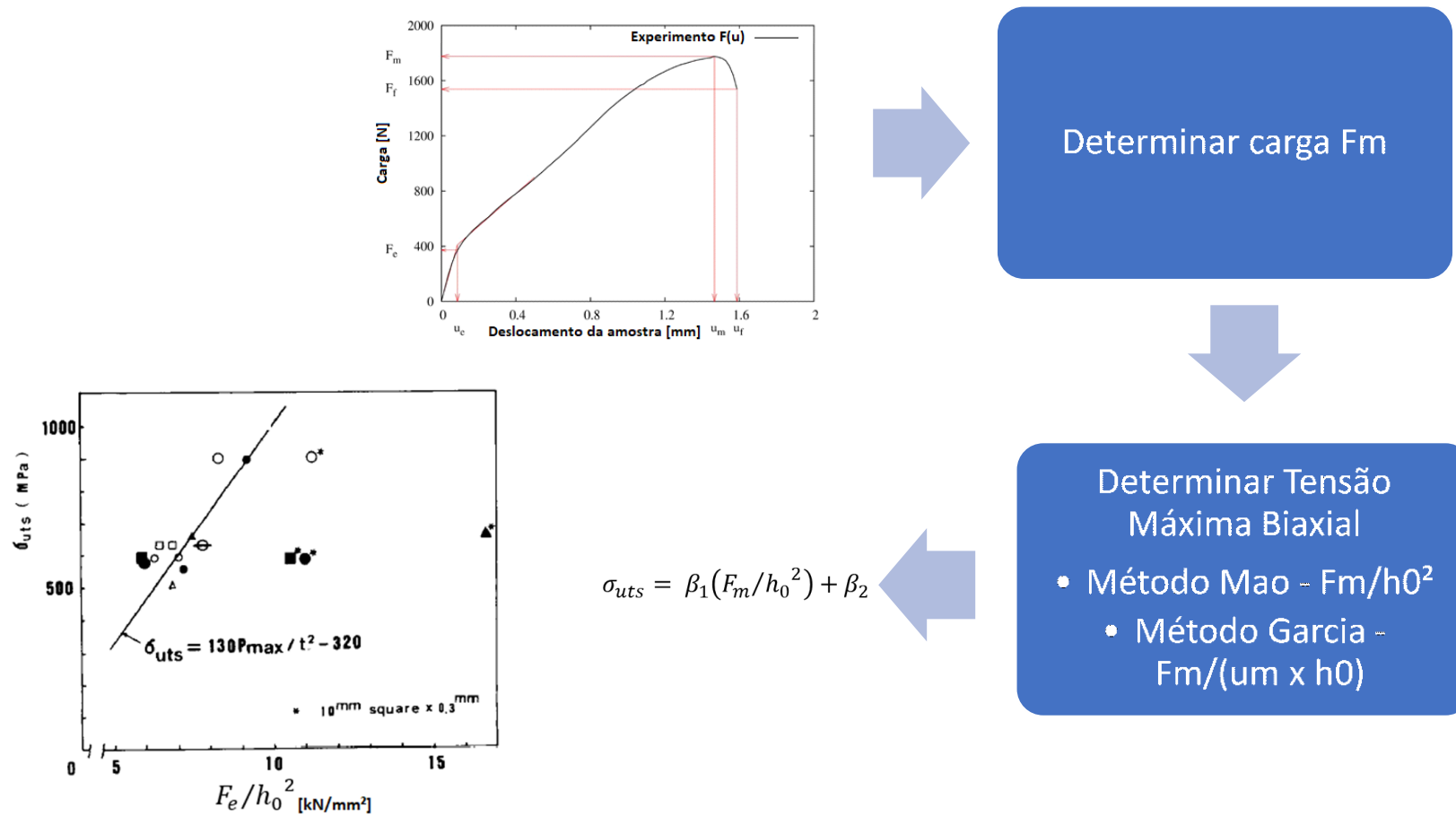
Fonte: (MAO; TAKAHASHI, 1987) Adaptado pelo autor.

Mao (1987) determinou os coeficientes  $\alpha_1 = 360,0$  e  $\alpha_2 = 0,0$  após o ajuste dos resultados de vários materiais testados em conjunto. Esses materiais estão identificados na Figura 27 e detalhados na Tabela 14. Sendo assim, seu objetivo era que, a partir do uso desses coeficientes, e com o resultado encontrado para a carga  $F_e$ , através do ensaio SPT para um dado material de interesse, fosse possível determinar sua tensão de escoamento, conforme ilustrado na Figura 27.

#### Determinação da Tensão Máxima

O fluxograma ilustrado na Figura 28 apresenta as principais etapas para a determinação da tensão máxima convencional, obtida por ensaio de tração uniaxial, através dos parâmetros observados no ensaio SPT. Na sequência, é abordado em detalhe a metodologia para cada parâmetro de teste.

**Figura 28** – Fluxograma das etapas para determinação da tensão máxima através do ensaio SPT.



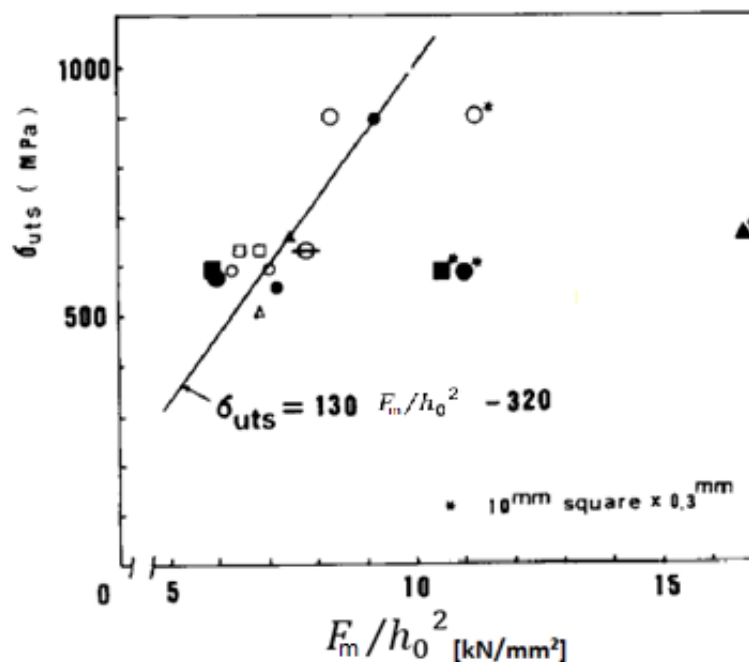
Fonte: O autor.

A partir da carga  $F_m$ , indicada na Figura 22, a tensão máxima do material é obtida através de uma relação linear semi-empírica entre os resultados registrados pelo método SPT e pelo ensaio de tração convencional. Essa relação foi introduzida pelas observações de Mao (MAO; TAKAHASHI, 1987), ver Figura 29, e ratificada por outros trabalhos (KAMEDA, 1994; LUCAS, 1990; MAO; SAITO; TAKAHASHI, 1991), sendo dada por:

$$\sigma_{uts} = \beta_1(F_m/h_0^2) + \beta_2 \quad (36)$$

$\sigma_{uts}$  [MPa] = Tensão máxima obtida através do ensaio convencional de tração;  $F_m$  [N] = Carga máxima registrada durante o ensaio SPT;  $h_0$  [mm] = Espessura inicial do corpo de prova;  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são as constantes determinadas pelo ajuste entre os resultados registrados pelo ensaio convencional de tração e o ensaio SPT.

Figura 29 – Relação entre a carga  $F_m$  e a tensão máxima.



Fonte: (MAO; TAKAHASHI, 1987) Adaptado pelo autor.

Utilizando a mesma sistemática e materiais empregados para encontrar a tensão de escoamento, Mao (1987) determinou os coeficientes  $\beta_1 = 130,0$  e  $\beta_2 = -320,0$  a serem utilizados na obtenção da tensão máxima de um material.

Garcia et. al. (2014) propuseram algumas variantes para o parâmetro de tensão máxima do ensaio SPT ( $F_m/h_0^2$ ). Uma seria o uso de apenas o valor  $h_0$  como denominador da divisão

do parâmetro, ficando como  $F_m/h_0$ . Contudo, essa abordagem não apresenta uma base conceitual válida, tendo sido proposto outra variante que seria utilizar, como denominador da divisão, o produto entre o deslocamento relativo à carga máxima ( $u_m$ ) e  $h_0$ , ficando o parâmetro de tensão máxima do ensaio SPT como  $F_m/(u_m \cdot h_0)$ . Essa abordagem foi a que obteve o melhor resultado em seu estudo. García, nesse mesmo trabalho, atribui essa performance ao fato de que o parâmetro  $u_m$  representa indiretamente a redução de espessura experimentada pelo corpo de prova durante o ensaio SPT. Como o valor de  $F_m$  depende da espessura, conforme trabalho de Lacalle, Álvarez e Gutiérrez-Solana (2008), o resultado está mais próximo do fenômeno físico, quando utilizado o denominador  $u_m \times h_0$ .

#### *Determinação da tenacidade à fratura*

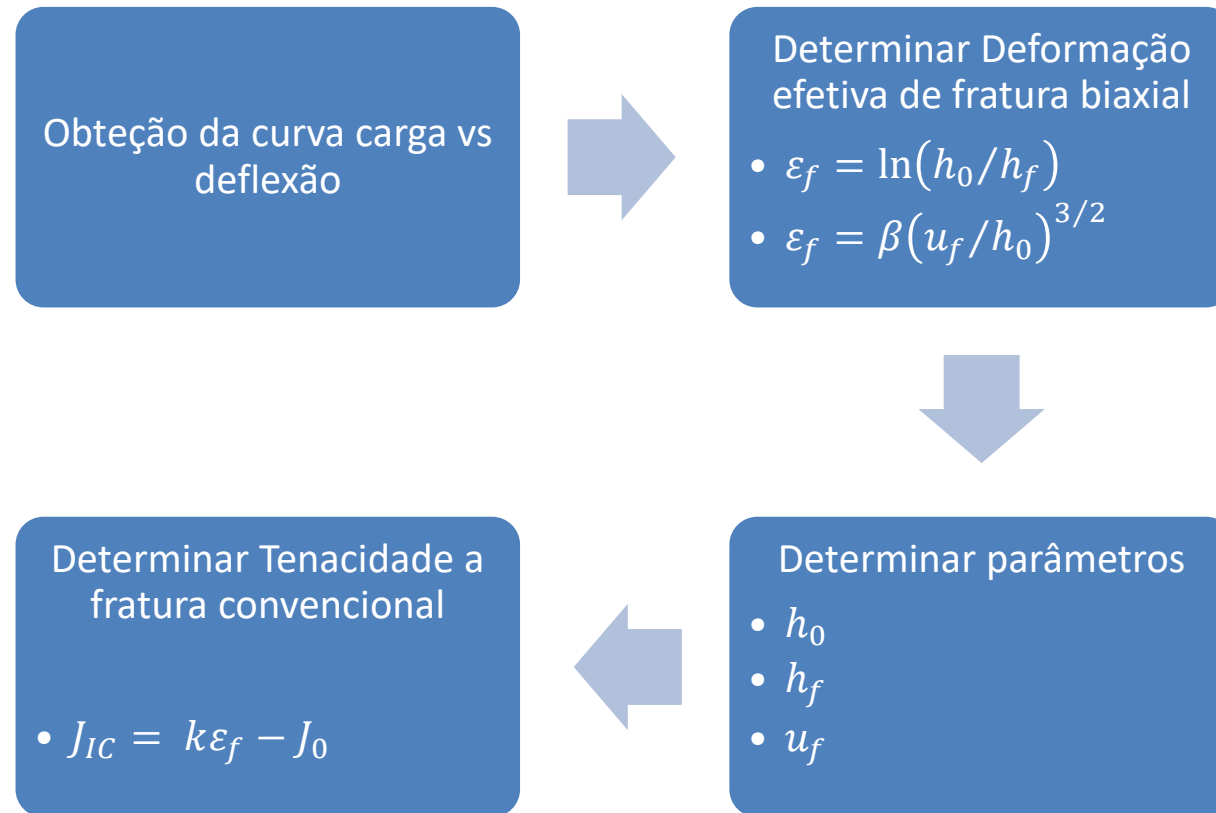
O guia europeu CWA 15627:2007 apresenta três métodos para a determinação da tenacidade à fratura, sendo dois baseados em correlações semi-empíricas e um terceiro na interpretação analítica dos resultados dos testes, são eles:

- a) Relação entre o ensaio SPT e o ensaio de impacto Charpy, e correlacionar seu resultado com a tenacidade, a fratura  $K_{IC}$  e a TTDF (Temperatura de transição dúctil – frágil);
- b) Correlação entre a deformação efetiva de fratura ( $\epsilon_f$ ), obtida através do ensaio SPT, e a tenacidade à fratura  $J_{IC}$  (Valor de Integral J crítico);
- c) Utilização de um corpo de prova SPT entalhado para a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura. A determinação da tenacidade à fratura pode ser realizada através da determinação do início da fratura, podendo ser utilizado o parâmetro CTOD.

A seguir, será detalhado o segundo método (alínea b), o qual foi utilizado neste trabalho.

O fluxograma ilustrado na Figura 30 apresenta as principais etapas para a determinação da tenacidade à fratura através dos parâmetros observados no ensaio SPT. Na sequência é abordado em detalhe a metodologia para cada parâmetro de teste.

**Figura 30** – Fluxograma das etapas para determinação da tenacidade à fratura através do ensaio SPT.



Fonte: O autor.

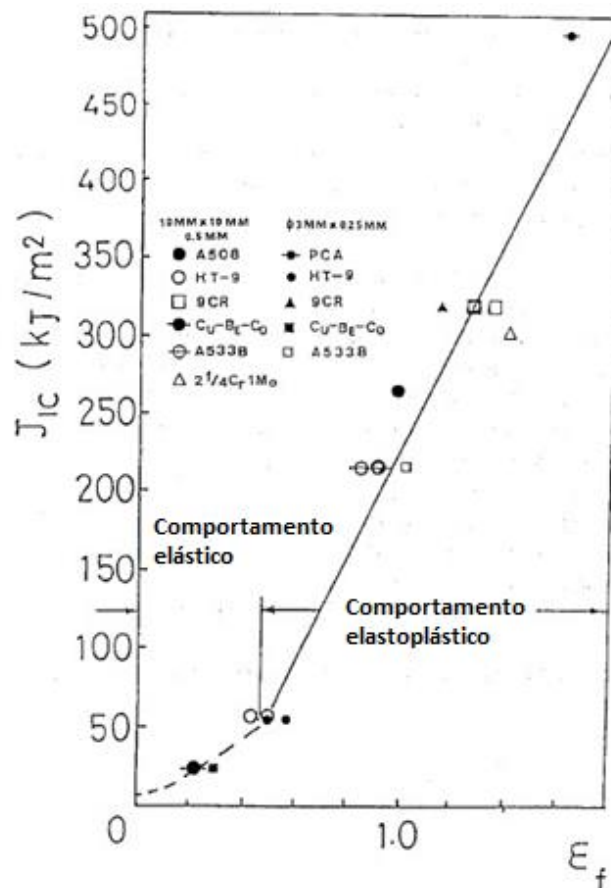
A partir da deformação efetiva de fratura biaxial, a tenacidade à fratura do material é obtida através de uma relação linear semi-empírica entre os resultados registrados pelo método SPT e os resultados dos ensaios de tenacidade convencionais da mecânica da fratura, sendo:

$$J_{IC} = k\varepsilon_f + J_0 \quad (37)$$

De modo que  $\varepsilon_f$  [adimensional] é a deformação efetiva de fratura;  $k$  e  $J_0$  são as constantes determinadas pelo ajuste entre os resultados registrados pelo ensaio convencional de tenacidade à fratura e o ensaio SPT. O documento CWA 15627:2007 não apresenta valores para as constantes  $k$  e  $J_0$ , sendo utilizados valores de trabalhos publicados.

Essa relação foi desenvolvida a partir da formulação analítica de Chakrabarty (1970) e a observação experimental conduzida por Bayoumi e Bassim (1983). Mao (1987), por sua vez, utilizou esses fundamentos para uma avaliação com um grupo de materiais distintos (MAO; TAKAHASHI, 1987), conforme mostrado na Figura 31, tendo sido ratificada por outros trabalhos (KAMEDA, 1994; LUCAS, 1990; MAO; SAITO; TAKAHASHI, 1991).

**Figura 31** – Gráfico da relação entre  $J_{IC}$  e  $\varepsilon_f$ .



Fonte: (MAO; TAKAHASHI, 1987) Adaptado pelo autor.

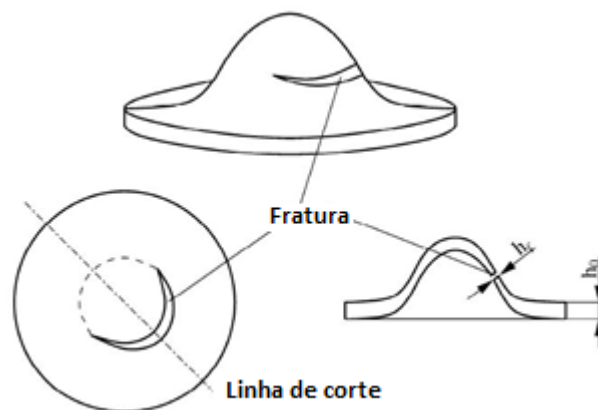
Observa-se, na Figura 31, que a relação linear é estabelecida para materiais com comportamento elastoplástico. Mao (1987) determinou os coeficientes  $k = 345,0 \text{ kJ}/\text{m}^2$  e  $J_0 = 113,0 \text{ kJ}/\text{m}^2$  após o ajuste dos resultados de vários materiais testados em conjunto, sendo assim, seu objetivo era que, a partir da utilização desses coeficientes, com o resultado encontrado para a deformação efetiva de fratura através do ensaio SPT para um dado material de interesse, fosse possível determinar sua tenacidade à fratura.

A deformação efetiva de fratura ( $\varepsilon_f$ ) pode ser definida pela equação 38:

$$\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f), \quad (38)$$

Na qual,  $h_0$  [mm] é a espessura inicial do corpo de prova;  $h_f$  [mm] é a espessura mínima da secção fraturada do corpo de prova adjacente à área de falha. O corpo de prova deve ser seccionado após o ensaio, para a medição de  $h_f$ , conforme ilustrado na Figura 32. Ou pela equação 39:

**Figura 32** – Esquema do corte do corpo de prova após ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007). Adaptado pelo autor.

$$\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^2, \quad (39)$$

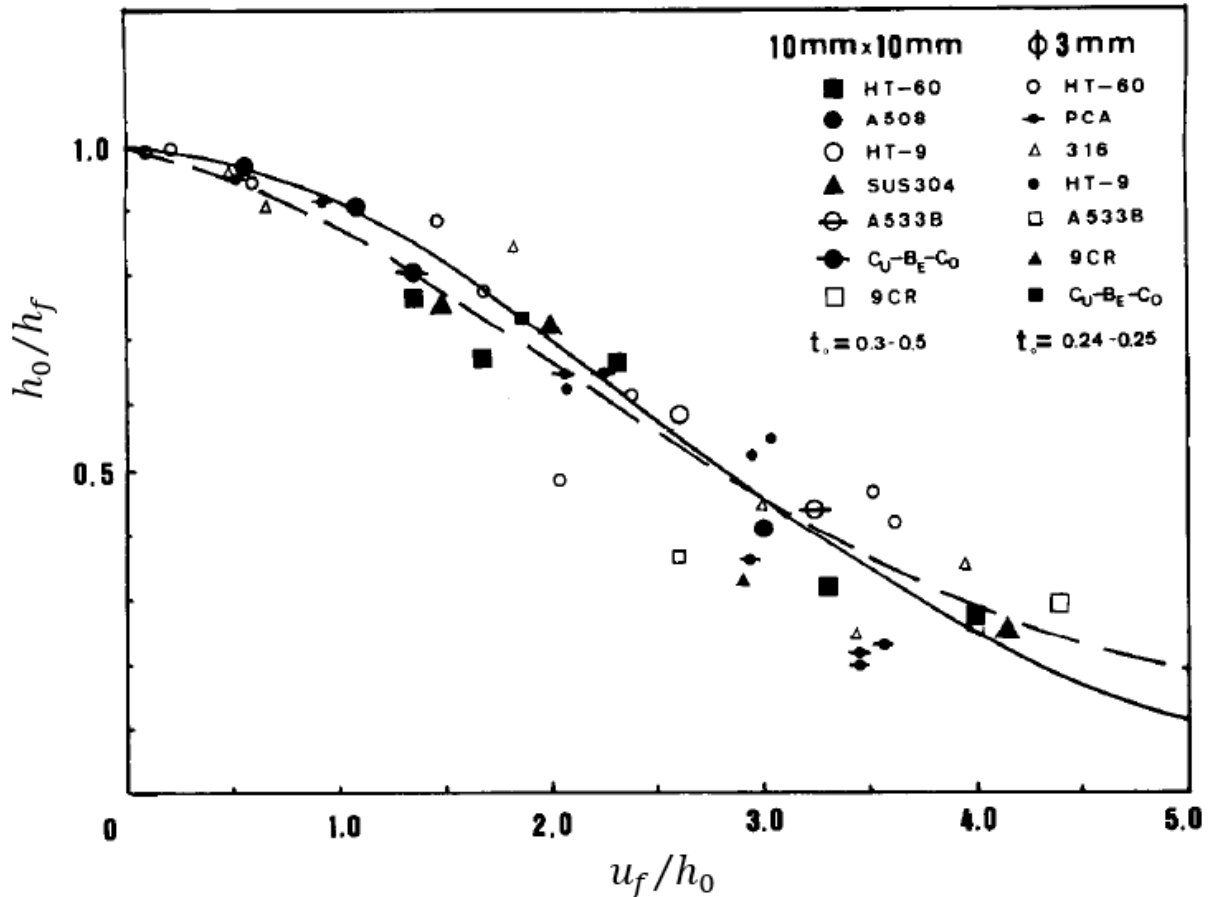
Em que  $u_f$  [mm] é a deflexão relativa à carga ( $F_f$ ) correspondente ao ponto onde ocorre uma queda abrupta na curva carga-deflexão, conforme ilustrado na Figura 22.

A equação 39 surgiu a partir da observação de Mao (1987) sobre a relação entre a redução de espessura ( $h_0/h_f$ ) e a deflexão ( $u_f/h_0$ ) do corpo de prova durante o ensaio SPT. Para isso, ele conduziu vários ensaios que foram interrompidos com deslocamento distintos. Ao plotar essas duas variáveis, ver Figura 33, ele chegou à seguinte relação:



$$h_0/h_f = e^{[-\beta(u_f/h_0)^2]} \quad (40)$$

**Figura 33** – Gráfico da relação entre  $(h_0/h_f)$  e  $(u_f/h_0)$ . Linha contínua  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^2$ , com  $\beta = 0,09$ ; Linha tracejada  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^{3/2}$ , com  $\beta = 0,15$ .



Fonte: (MAO; TAKAHASHI, 1987) Adaptado pelo autor.

Efetuada o ajuste da curva, foi obtido o coeficiente  $\beta$  que tem valor de 0,09 para aços ferríticos e 0,043 para aços austeníticos. A metodologia, utilizando-se o valor de  $\beta$  para determinar o valor da deformação efetiva de fratura, tem como vantagem a dispensa da medição da espessura do corpo de prova após a fratura ( $h_f$ ). Essa etapa é de difícil execução e sujeita a erros inerentes ao processo de medição.

O grande desafio apontado por Takahashi, parceiro de Mao nos estudos do SPT, foi encontrar o valor de  $\varepsilon_f$ . Para baixas temperaturas, a fratura ocorre na carga máxima ( $F_m$ ), a qual é bem caracterizada no gráfico carga-deflexão. Contudo, para materiais com comportamento elastoplástico, existe uma evolução do dano até a ruptura do material, passando por microtrincas até a fratura total. Assim, Takahashi estabeleceu que a espessura mínima ocorre no valor de carga de fratura ( $F_f$ ) que é vinculado ao valor de deflexão  $u_f$  (TAKAHASHI et al., 1988).

O guia europeu CWA 15627:2007 (CEN, 2007), determina que  $u_f$  é definido pela carga  $F_f$  como:

$$F_f = 0,8 \cdot F_m \quad (41)$$

Mao, Saito e Takahashi (1991) apresentaram novas equações para a determinação dos valores de tenacidade à fratura em um estudo que realizaram com materiais de comportamento dúctil (HT-9, A533B, 9Cr-2Mo, A508, Cu-Be-Co) e frágil (SiC, Y2O3, Al2O3, Si3N4, e outros). Foi utilizada a relação a seguir para calcular o valor da deformação efetiva de fratura em um estado biaxial de deformação no ensaio SPT:

$$\varepsilon_f = 0,15(u_f/h_0)^{3/2} \quad (42)$$

Mao, Saito e Takahashi (1991) concluíram que as seguintes relações são válidas para estimar a tenacidade à fratura para o ensaio SPT em materiais dúcteis e frágeis, respectivamente:

$$J_{IC} = 42(u_f/h_0)^{3/2} - 50 \text{ e} \quad (43)$$

$$K_{IC} = 0,07(\sigma_{f(SP)})^{2/3}. \quad (44)$$

Em que  $\sigma_{f(SP)}$  é a tensão de fratura, calculada como:

$$\sigma_{f(SP)}[MPa] = 130 F_m/h_0^2 - 320, \quad (45)$$

De modo que  $F_m$  é dado em kN, e  $h_0$  é dado em mm. A equação para material dúctil é válida quando  $(u_f - u_e)/u_f > 0,6$ , e para material frágil é válida quando  $(u_f - u_e)/u_f < 0,2$ . Sendo que  $(u_f - u_e)$  corresponde à região não linear da curva carga-deflexão correspondente à plastificação por deflexão e estiramento do corpo de prova.

## 4 MATERIAL E MÉTODO

### 4.1 INTRODUÇÃO

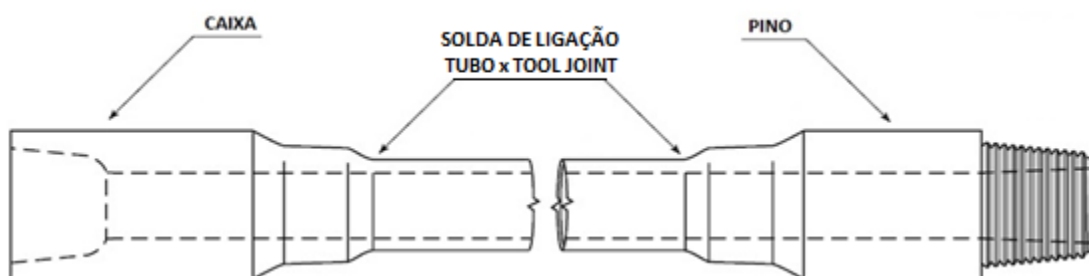
Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para a execução do ensaio SPT, visando a determinação da tensão de escoamento, tensão máxima e tenacidade à fratura do aço API 5DP *Tool Joint*, em corpo de prova miniaturizado, sem entalhe, com base na proposta do guia CWA 15627:2007. Além disso, descreve-se também a metodologia para a caracterização mecânica da tensão de escoamento e da tensão máxima através do ensaio convencional de tração e para a estimativa da tenacidade à fratura com base no ensaio de impacto *Charpy*, também para o aço API 5DP *Tool Joint*.

### 4.2 MATERIAL

O material sob estudo é o aço API 5DP *Tool Joint*, removido da conexão pino de um Drill Pipe. O *Tool Joint* foi produzido pelo processo de forjamento do aço com posterior tratamento térmico de têmpera e revenido para atingir as características mecânicas requeridas por norma. Os dados de patamares do tratamento térmico da amostra analisada não estão disponíveis.

O Drill Pipe é um tubo sem costura, extrudado, com uniões cônicas nas extremidades, ligadas ao tubo por soldagem. O Drill Pipe faz parte da coluna de perfuração e sua principal função é transmitir o torque e rotação, bem como circular o fluido de perfuração na coluna. A Figura 34 ilustra o desenho típico de um Drill Pipe e suas conexões cônicas *Tool Joint Pin* (Pino) e *Box* (Caixa).

**Figura 34** – Desenho esquemático de um *Drill Pipe* e suas conexões cônicas *Tool Joint Pin* (Pino) e *Box* (Caixa).



Fonte: (API, 1998) Adaptado pelo autor.

As amostras foram retiradas de um tubo usado, contudo, esse apresenta-se em boas condições. Foi realizada uma inspeção visual e dimensional da peça, não sendo detectada nenhuma indicação de descontinuidade proveniente de danos em serviço que pudessem alterar as características mecânicas dos corpos de prova ensaiados.

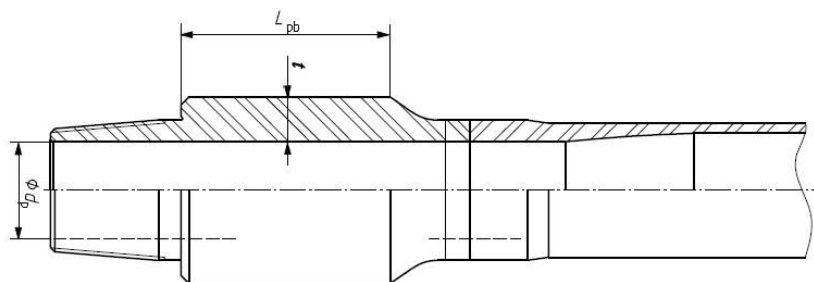
Todos os corpos de prova foram removidos da área central do pino, correspondente ao comprimento  $L_{pb}$  da Figura 36. A Figura 35 ilustra a região central da conexão pino após corte em serra fita. Essa região foi escolhida para remoção das amostras devido à alta espessura apresentada, possibilitando assim a remoção de todos os corpos de prova para ensaio. Os requisitos para a composição química e características mecânicas são diferentes para o tubo e para as conexões.

**Figura 35** – Corte da conexão cônica *Tool Joint Pin* (Pino).



Fonte: O autor.

**Figura 36** – Dimensões da conexão cônica *Tool Joint Pin* (Pino).



Diâmetro Nominal Drill Pipe [in.] (mm)	t [in.] (mm)	Ø dp [in.] (mm)	Lpb [in.] (mm)
5 127,0	1 3/4 44,5	3 1/2 88,9	8 203,2

Fonte: (API, 2018) Adaptado pelo autor.

### 4.3 MÉTODO PARA EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

O plano experimental para a caracterização das propriedades mecânicas do API 5DP *Tool Joint* é apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4** – Ensaio para caracterização do aço API 5DP *Tool Joint*.

Ensaio	Quantidade de amostras (CP)	Doc. Referência
Análise Química	1	ASTM E30 ASTM E350 ASTM E354
Tração	3	ASTM E8
Impacto <i>Charpy</i>	22	ASTM A370 ASTM E23
SPT	8	CWA 15627

Fonte: O autor.

#### 4.3.1 Análise Química

Foi executada a preparação da amostra para a remoção de impurezas superficiais com posterior análise por fluorescência de raios X, utilizando a pistola THERMO SCIENTIFIC NITON, modelo XL2-57753, para a identificação da composição química do material. A determinação do teor de carbono foi realizada pelo processo de queima utilizando o analisador LECO, modelo WR12. Os ensaios foram executados em conformidade com as normas ASTM E30 / E350 / E354.

#### 4.3.2 Análise Microestrutural

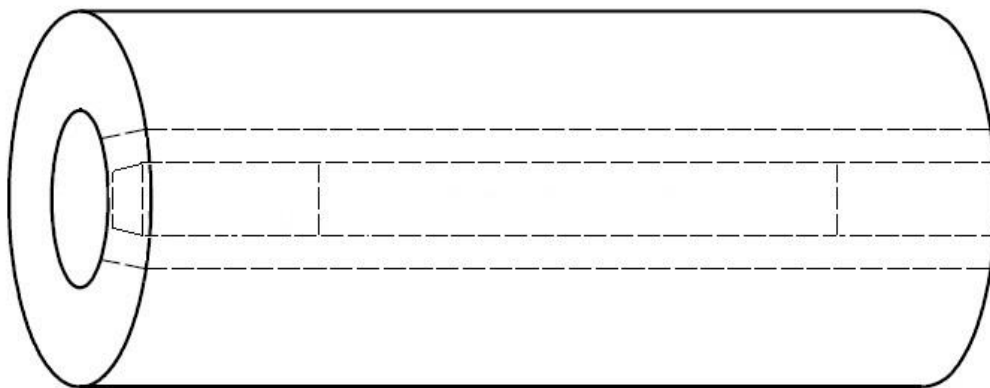
Foi executada a preparação da amostra para a remoção de impurezas superficiais com posterior análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca TESCAN, modelo VEGA 3 LMU, acoplado com Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) de Raios X, marca OXFORD INSTRUMENTS, modelo 51-ADD0007, com tensão de 15,0kV e magnificação conforme registro fotográfico, para a caracterização da microestrutural do material.

Para a avaliação da microestrutura, foi realizado ataque das amostras com Nital 2% por 10 segundos.

### 4.3.3 Ensaio de tração

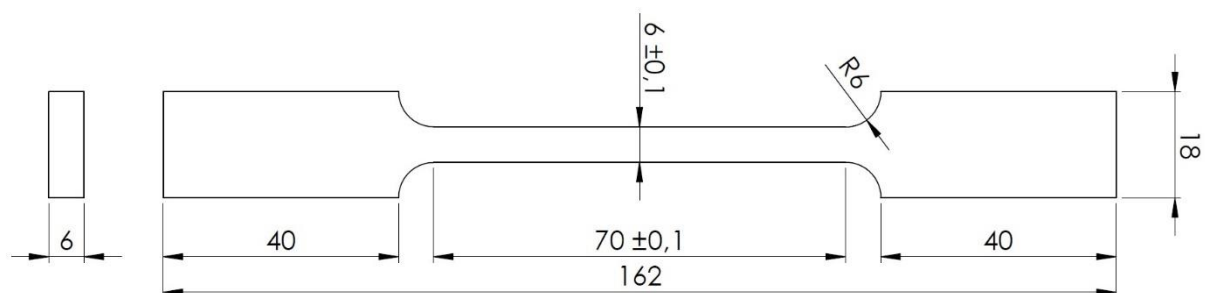
Foram removidos os corpos de prova de tração da parte central do pino, conforme localização ilustrada na Figura 37, através de corte longitudinal em máquina serra fita. Após o corte com serra fita, foi realizada a usinagem das peças com corte por eletroerosão da geometria da peça e acabamento com retífica em máquina de comando número computadorizado, obtendo as dimensões apresentadas no desenho da Figura 38.

**Figura 37** – Localização da região de corte dos corpos de prova de tração.



Fonte: (API, 2018) Adaptado pelo autor.

**Figura 38** – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração. Unidade milímetros.



Fonte: O autor.

O ensaio foi conduzido à temperatura de 22,0 °C, em uma máquina universal de ensaios, eletromecânica e microprocessada, fabricante SHIMADZU, modelo AG-IC 100kN, utilizando uma célula de carga variável automaticamente de 5 kN até o máximo de 100 kN. O deslocamento foi monitorado pelo extensômetro SHIMADZU, modelo SG50-50, com resolução de 0,0001 mm. Os dados dos testes foram adquiridos pelo sistema TRAPEZIUM,

que acompanha o equipamento. Foi utilizada a taxa de 0,45 mm/min para execução do ensaio de tração com controle de deslocamento. Também, foi utilizado o comprimento de referência de 50,0 mm para determinação do alongamento dos corpos de prova, sendo que todas as rupturas ocorreram na região central. A execução do ensaio foi realizada com base na norma ASTM E8. A Figura 39 ilustra os dispositivos utilizados para o ensaio de tração.

**Figura 39** – Esquema de execução do ensaio de tração.

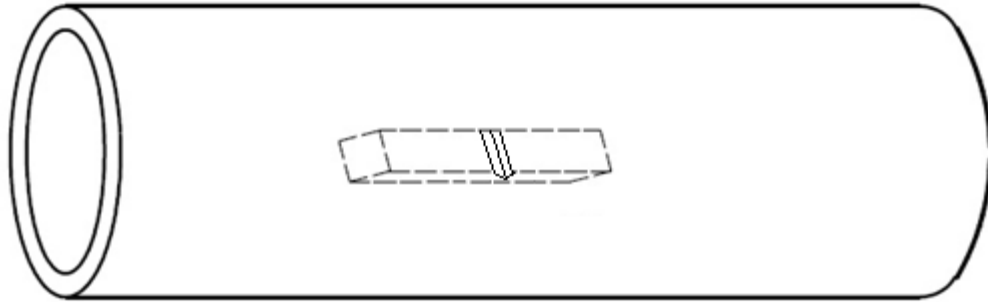


Fonte: O autor.

#### **4.3.4 Ensaio de Impacto *Charpy***

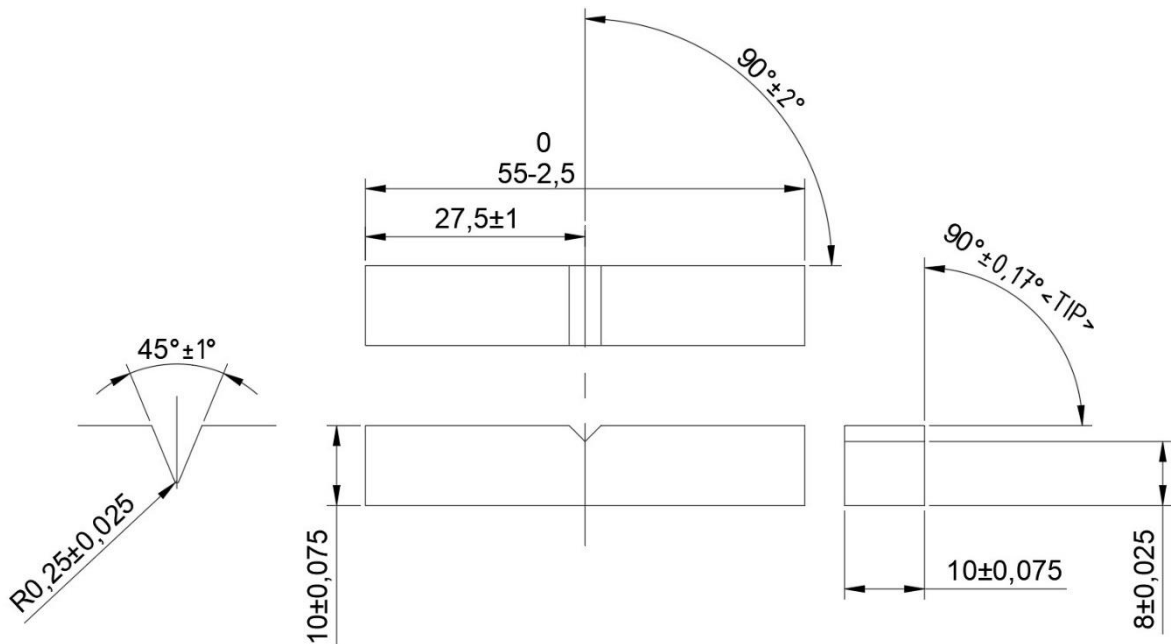
Foram removidos os corpos de prova de Impacto *Charpy* da parte central do pino, conforme localização ilustrada na Figura 40, através de corte longitudinal em máquina serra fita. Após o corte com serra fita, foi realizada a usinagem das peças com corte por eletroerosão da geometria da peça e acabamento com retífica em máquina de comando número computadorizado. O entalhe foi produzido por máquina plaina limadora e o perfil do entalhe avaliado em projetor de perfil, obtendo as dimensões apresentadas no desenho da Figura 41.

**Figura 40** – Localização da região de corte dos corpos de prova de Impacto *Charpy*.



Fonte: O autor.

**Figura 41** – Dimensões do corpo de prova para ensaio de Impacto *Charpy*.



**Acabamento superficial em todas as faces menor que 2  $\mu\text{m}$  (Ra).**

Fonte: O autor. Unidade milímetros.

Os corpos de prova de Impacto *Charpy* foram ensaiados em uma máquina para teste de impacto, fabricante TINIUS OLSEN, modelo 74 Universal. Os corpos de prova foram mantidos em caixa metálica isolada termicamente. Para os corpos de prova testados acima da temperatura ambiente, foi utilizado banho em água aquecida por resistência elétrica para a adequação das temperaturas. Naqueles corpos de prova testados abaixo da temperatura ambiente, até o valor de  $-70^{\circ}\text{C}$ , foi utilizada mistura de gelo seco com álcool, e para as temperaturas abaixo de  $-70^{\circ}\text{C}$  até  $-187^{\circ}\text{C}$  foi utilizado Nitrogênio líquido para a adequação das temperaturas. Utilizou-se também uma pinça metálica para a retirada dos corpos de prova da caixa isolada. A pinça foi mantida dentro da caixa para a equalização da temperatura durante todo o teste. A temperatura



durante todo o ensaio foi monitorada por termopar interligado ao termômetro digital Minipa MT-450. Após a estabilização da temperatura desejada, o patamar foi mantido por cinco minutos e, na sequência, efetuado o teste com a retirada do corpo de prova da caixa isolada com pinça metálica, posicionamento do corpo de prova na máquina e acionamento do martelo em intervalo inferior a 15 segundos. A leitura dos resultados foi realizada no mostrador analógico da própria máquina. A execução do ensaio foi conduzida com base na norma ASTM A370 e E23. A Figura 42 ilustra os dispositivos utilizados para o ensaio de Impacto.

**Figura 42** – Esquema de execução do ensaio de Impacto *Charpy*.

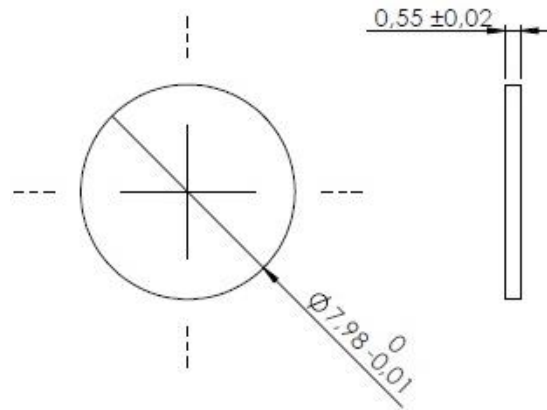


Fonte: O autor.

#### 4.3.5 Ensaio SPT

Foram removidos os corpos de prova para o ensaio SPT da parte central do pino, conforme localização ilustrada na Figura 37, através de corte longitudinal em máquina serra fita. Após o corte com serra fita, foi realizada a usinagem das peças com corte por eletroerosão da geometria da peça e acabamento com retífica em máquina de comando número computadorizado, obtendo as dimensões apresentadas no desenho da Figura 43.

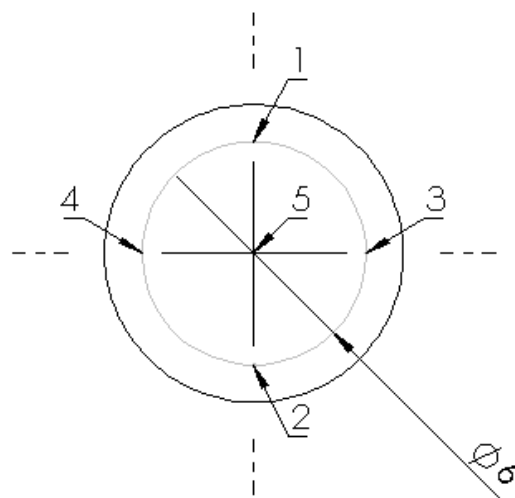
**Figura 43** – Dimensões do corpo de prova para ensaio SPT.



Fonte: O autor. Unidade milímetros.

Após o acabamento final das peças realizado por retífica com ferramenta diamantada, foi aplicado lixamento manual com as lixas P320, P500 e P1200. Antes do ensaio, foi registrado o valor da espessura final, utilizando-se um micrômetro externo digital, série 293 da Mitutoyo, com resolução de 0,001mm. Os valores obtidos das medições foram registrados no APÊNDICE A – MEDIÇÕES DOS CORPOS DE PROVA SPT APÓS LIXAMENTO, na Tabela 22. Os locais de medição podem ser vistos no desenho da Figura 44. Ainda no apêndice A, na Tabela 23, foram registrados os valores de rugosidade superficial medidos dos corpos de prova, utilizando-se um rugosímetro Mahr, modelo Perthometer M4Pi, com um comprimento de varredura de 4,80 mm. Os corpos de prova ensaiados tinham espessura média de 534  $\mu\text{m}$   $\pm 4,6\mu\text{m}$  e rugosidade superficial média de 0,04  $\mu\text{m}$   $\pm 0,01 \mu\text{m}$ .

**Figura 44** – Locais de medição da espessura do corpo de prova para ensaio SPT.



Fonte: O autor. Unidade milímetros.

O corpo de prova foi posicionado no alojamento da sede inferior do dispositivo de teste, que por sua vez é apresentado no APÊNDICE B – DETALHAMENTO DO DISPOSITIVO DE TESTE. Foram conduzidos dois tipos de teste SPT: na condição engastada e na condição livre, sendo que foram utilizados quatro corpos de prova para estudar cada condição de teste. Maiores detalhes dessas condições ver ANEXO A – METODOLOGIA PARA O ENSAIO SPT CONFORME CWA 15627.

Para o ensaio na condição Livre, foi criado um espaço entre as sedes de 1,0 mm, como condição inicial para os testes. Para as amostras testadas na condição engastada, foi realizada a fixação do dispositivo através de quatro parafusos M4 torqueados manualmente. Para ambas as condições de teste, foi utilizado óleo lubrificante ISO VG 10 para a redução do atrito entre o corpo de prova e as sedes.

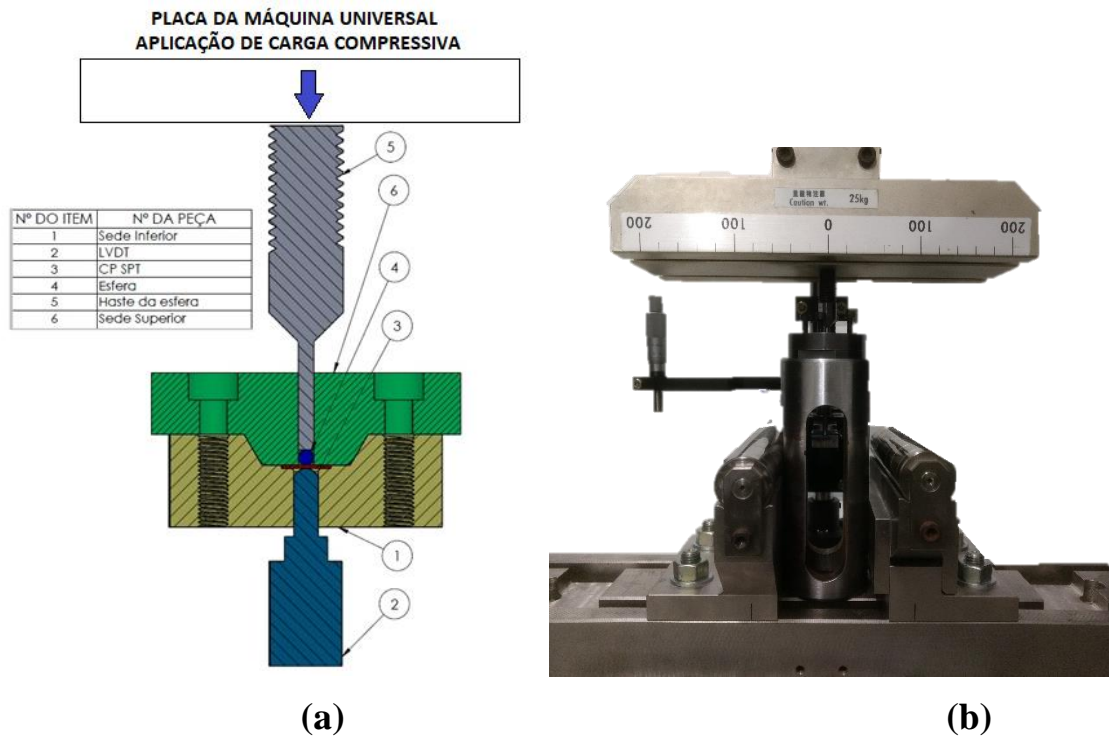
O ensaio foi conduzido à temperatura de 22,0 °C, em uma máquina universal de ensaios, eletromecânica e microprocessada, fabricante SHIMADZU, modelo AG-IC, utilizando uma célula de carga de 5kN.

A carga de teste foi transferida ao corpo de prova através da compressão exercida pela placa da máquina sobre uma haste que estava em contato direto com uma esfera de 2,5 mm de diâmetro, confeccionada em Carbetto de Tungstênio, posicionada em sua extremidade livre.

O deslocamento do corpo de prova (deflexão) foi monitorado por um dispositivo de medição da SHIMADZU, que possui um LVDT, modelo DT-5P-SP, com resolução de 0,001 mm, posicionado diretamente sob o centro do corpo de prova, na face oposta a aplicação da carga.

Os dados dos testes foram aquiridos pelo sistema TRAPEZIUM, que acompanha o equipamento. Foi utilizada a taxa de deslocamento de 0,1 mm/min para a execução do ensaio SPT. A Figura 45 ilustra os dispositivos utilizados para a execução do ensaio SPT.

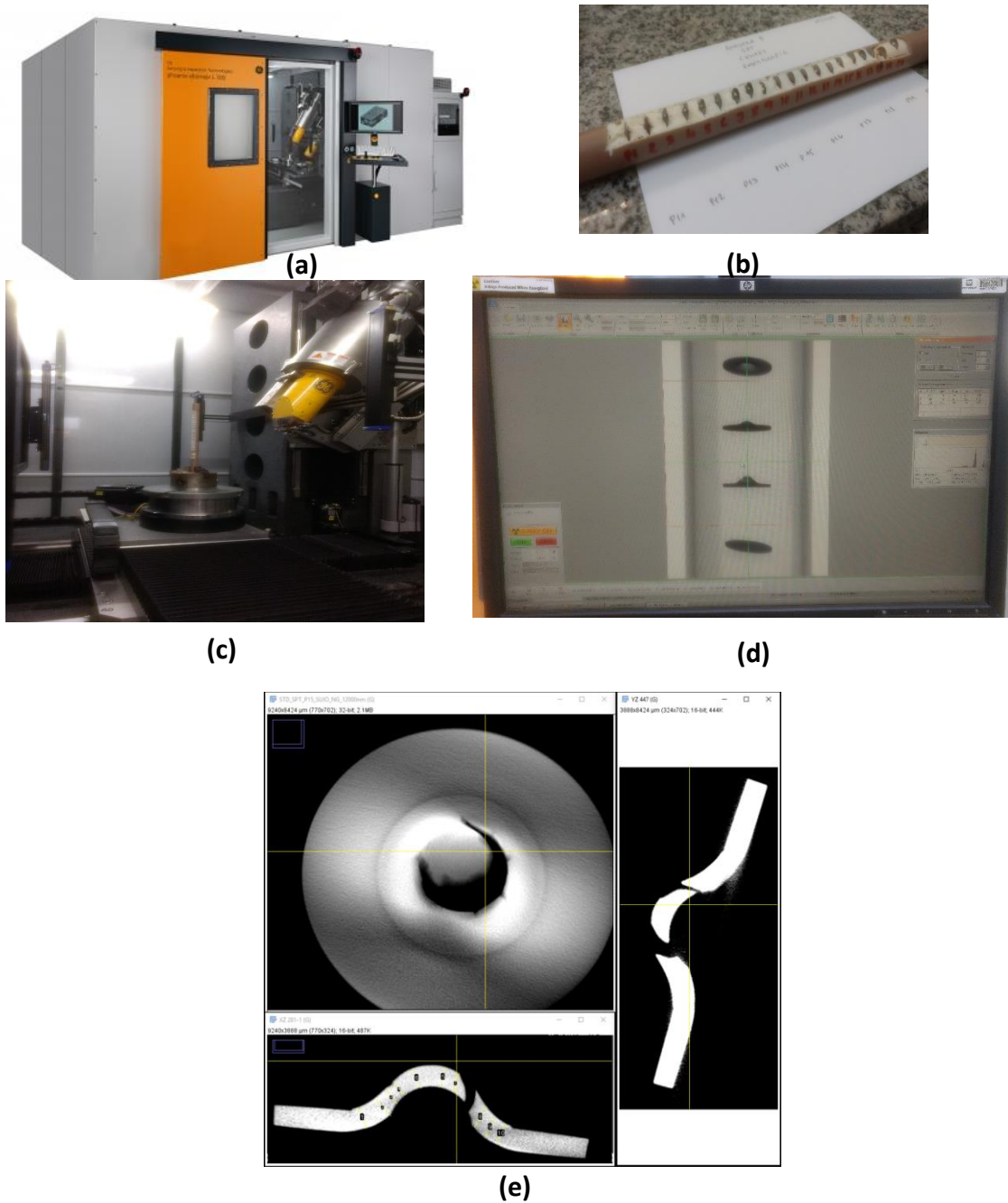
**Figura 45** – Esquema de execução do ensaio SPT.



Fonte: O autor. (a) Desenho esquemático. (b) Fotografia da montagem do dispositivo.

Após o término do ensaio SPT, foi realizada uma tomografia computadorizada dos corpos de prova, utilizando o tomógrafo GE, modelo *Phoenix v tome x*, para a medição da espessura final  $h_f$  na região da fratura. As amostras foram empilhadas usando um dispositivo fabricado com tubo de PVC de 20,0 mm e recheado internamente com espuma expansiva, conforme item (b) da Figura 46. As imagens dos corpos de prova foram obtidas individualmente, utilizando tensão de 120 kV, corrente de 100  $\mu$ A, filtro de Quartzo de 10,0 mm de espessura, resolução voxel de 12,000  $\mu$ m. Cada aquisição durou 24 minutos, gerando 720 imagens. Após a obtenção das imagens, foi utilizado o software livre *Fiji ImageJ* para tratamento e medição da espessura remanescente da área fraturada, como ilustrado na Figura 46.

**Figura 46** – Esquema de execução da tomografia computadorizada das amostras pós ensaio SPT e tratamento de imagem no Fiji ImageJ.



Fonte: O autor. (a) Tomógrafo GE. (b) tubo de PVC utilizado para empilhamento das amostras. (c) Digitalização dos corpos de prova. (d) Imagem das amostras digitalizadas. (e) Tratamento das imagens e medição da espessura da região de fratura no programa Fiji Image J.

## 4.4 MÉTODO PARA TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

### 4.4.1 Análise Química

Foi realizada a comparação direta entre o resultado da análise química do material e o especificado na norma API 5DP para o aço API 5DP *Tool Joint*.

### 4.4.2 Análise Microestrutural

Foi realizada a comparação direta entre o resultado da análise microestrutural do material e o especificado na norma API 5DP para o aço API 5DP *Tool Joint*.

### 4.4.3 Ensaio de tração

Foi realizada a comparação direta entre o resultado do ensaio de tração do material e o especificado na norma API 5DP para o aço API 5DP *Tool Joint*.

Para a determinação do valor do módulo de elasticidade, foi utilizada a metodologia da norma ASTM E111 (ASTM, 2017) com a aplicação do ajuste de curva pelo método da regressão linear. Para a determinação do valor de alongamento, tensão de escoamento e tensão máxima, foi utilizada a metodologia da norma ASTM E8 (ASTM, 2016a), sendo empregado, para o limite de escoamento, um offset 0,2%, uma vez que o material não apresentou, para todas as amostras, um patamar característico para a identificação desse valor graficamente.

Para a determinação dos parâmetros de encruamento, foi utilizada a relação de potência  $\sigma_r = k \cdot \varepsilon_r^n$ .

### 4.4.4 Ensaio de Impacto *Charpy*

Foi realizada a comparação direta entre o resultado do ensaio de impacto *Charpy* do material e o especificado na norma API 5DP para o aço API 5DP *Tool Joint*.

Para efetuar o ajuste dos dados e construir a curva TTDF, utilizou-se a expressão da tangente hiperbólica proposta no relatório EPRI-NP-2428, emitido pela *Electric Power Research Institute* dos EUA (OLDFIELD et al., 1982).

#### 4.4.5 Ensaio de SPT

##### *Determinação da tensão de escoamento*

A tensão de escoamento do material foi determinada utilizando a relação  $\sigma_{ys} = \alpha_1(F_e/h_0^2) + \alpha_2$ , sendo os coeficientes  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  definidos a partir do ajuste dos resultados experimentais obtidos neste trabalho.

##### *Determinação da tensão máxima*

A tensão máxima do material foi determinada, utilizando a relação  $\sigma_{uts} = \beta_1(F_m/h_0^2) + \beta_2$ , sendo os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  definidos a partir do ajuste dos resultados experimentais obtidos neste trabalho.

##### *Determinação da tenacidade à fratura*

A tenacidade à fratura do material foi determinada, utilizando a relação  $J_{IC} = k\varepsilon_f + J_0$ , sendo os coeficientes  $k$  e  $J_0$  definidos a partir do ajuste dos resultados experimentais obtidos neste trabalho.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE QUÍMICA

A composição química do material é apresentada na Tabela 5. A norma API 5DP, que especifica os parâmetros para enquadramento do aço API 5DP *Tool Joint*, determina requisitos apenas para os elementos Enxofre e Fósforo na composição do aço, sendo esses teores máximos de 0,015% e 0,020% em massa, respectivamente. A amostra ensaiada atende o requisito especificado em norma.

**Tabela 5** – Composição química do aço API 5DP *Tool Joint*. Apresentação dos elementos em percentual de massa.

C	Mn	Cr	Si	Mo	Ni	S	P
0,4	0,94	0,96	0,21	0,27	0,1	0,013	0,01
Cu	Al	Co	Nb	Ti	V	B	Fe
0,19	0,021	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	Balanço

Fonte: O autor.

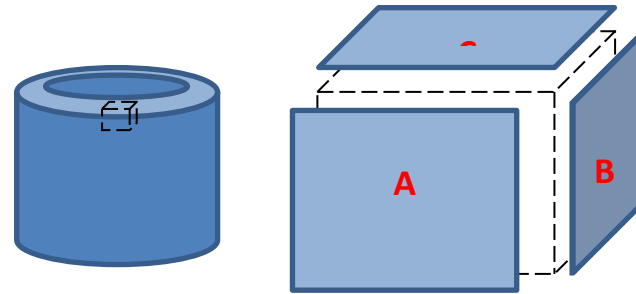
### 5.2 ANÁLISE METALOGRAFICA

Foram observadas três direções distintas: A – Direção Longitudinal ao eixo do tubo; B – Direção transversal ao eixo do tubo (tangencial); C – Direção transversal ao eixo do tubo (espessura), conforme ilustrado na Figura 47.

Já a Figura 48 apresenta a microestrutura da amostra de aço API 5DP *Tool Joint*, obtida através do MEV, para cada uma das direções observadas. Essas são compostas por uma matriz de martensita revenida e grãos de bainita com presença de inclusões, característica dos aços de baixa liga e alta resistência utilizados para a produção da conexão cônica do *Drill Pipe*. Observa-se que as três direções ensaiadas apresentam a mesma estrutura metalográfica, inexistindo um eixo de forjamento preferencial, situação já esperada, uma vez que o tratamento térmico é realizado após a conformação mecânica, induzindo uma homogeneização da microestrutura.

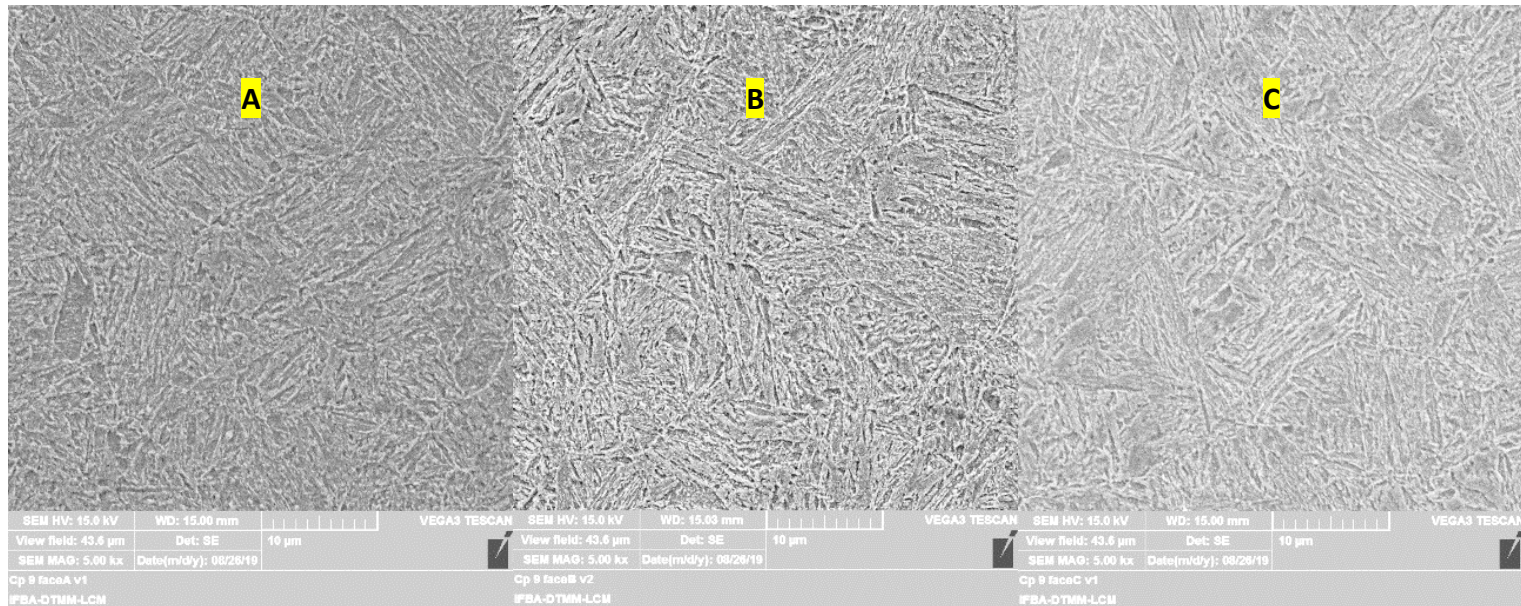


**Figura 47** – Direções de avaliação da microestrutura do aço API 5P Tool Joint.



Fonte: O autor.

**Figura 48** – Microestrutura do aço API 5P Tool Joint.

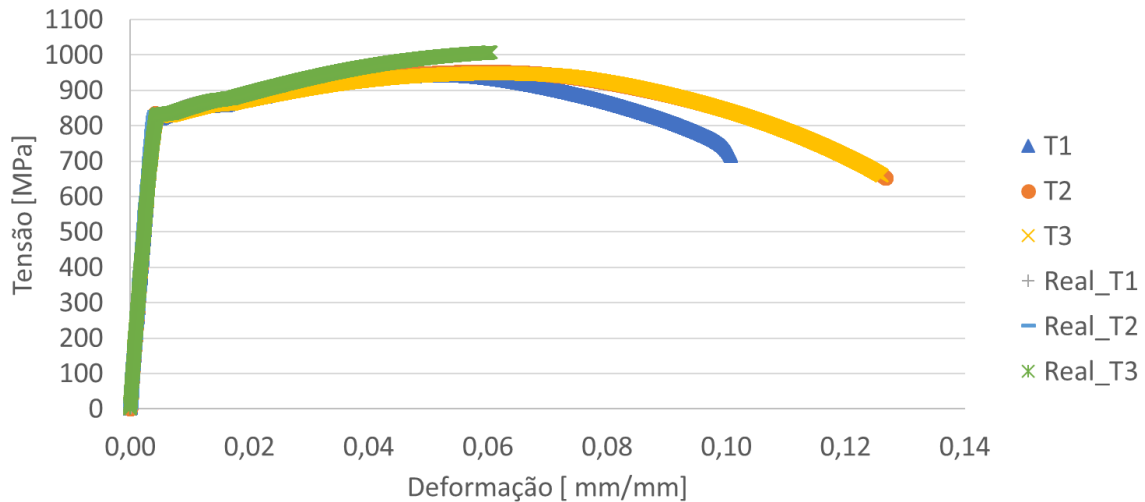


Fonte: O autor. Matriz de martensita revenida e grãos de bainita com presença de inclusões (a) Direção Longitudinal ao eixo do tubo; (b) Direção transversal ao eixo do tubo (tangencial); (c) Direção transversal ao eixo do tubo (espessura).

### 5.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

As curvas tensão vs. deformação convencional (de engenharia) e real são ilustradas na Figura 49.

**Figura 49** – Curva tensão vs. deformação de engenharia e real do aço API 5DP *Tool Joint*.



Fonte: O autor.

A Tabela 6 apresenta os valores de tensão de escoamento, tensão máxima, módulo de elasticidade, alongamento, coeficiente de resistência e encruamento encontrados para as amostras ensaiadas.

**Tabela 6** – Resultado do ensaio de tração do aço API 5DP *Tool Joint*.

Corpo de prova	Tensão de Escoamento offset=0,2% [MPa]	Tensão Máxima [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Alongamento %	k [MPa]	n
T1	830,00	942,53	207,26	10,10%	19.597,77	0,051
T2	836,00	952,50	215,08	12,78%	17.626,00	0,057
T3	832,00	948,24	201,70	12,82%	16.656,63	0,060
Média	832,67	947,75	208,01	11,90%	17.960,13	0,056
Desvio Padrão	3,06	5,00	6,72	1,56%	1.498,77	0,005

Fonte: O autor.

A norma API 5DP, que especifica os parâmetros para enquadramento do aço API 5DP *Tool Joint*, determina como requisito para tensão de escoamento: mínimo de 827 MPa e máximo de 1.138 MPa; tensão máxima: mínimo 965 MPa; alongamento: mínimo de 13%. As

amostras ensaiadas não atenderam aos requisitos de tensão máxima e alongamento especificados em norma, apesar de possuírem valores próximos ao mínimo exigido.

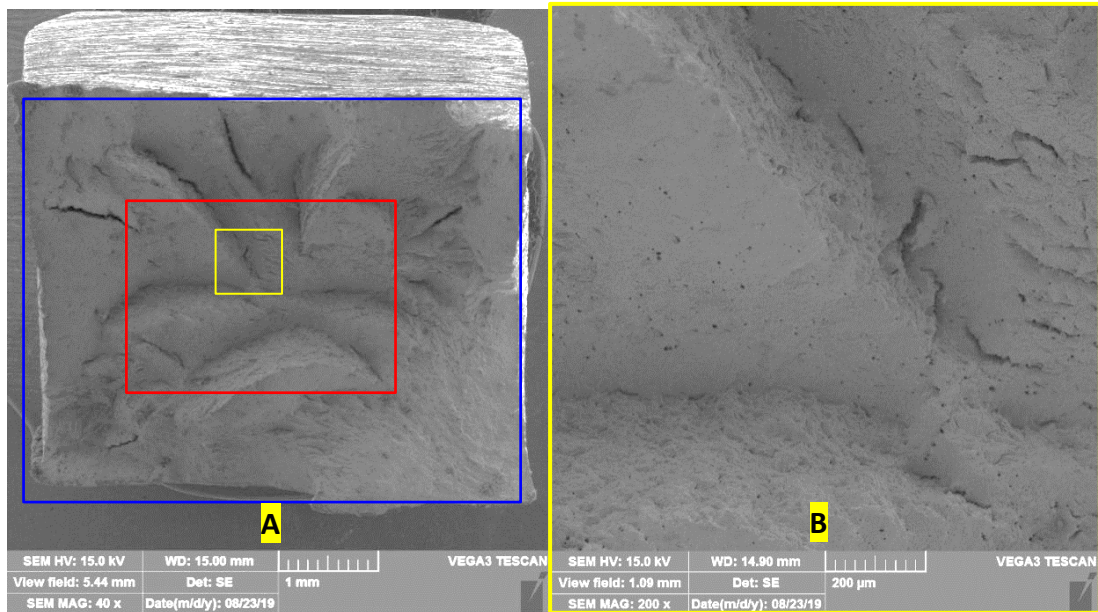
A partir da Figura 49, observa-se que a curva registrada para o corpo de prova T1 absorveu menos energia de deformação até a ruptura em relação às demais peças testadas. Os corpos de prova T2 e T3 apresentaram praticamente o mesmo comportamento durante o ensaio.

Nota-se que a curva tensão vs. deformação real para os três corpos de prova apresentam comportamento semelhante. O coeficiente de resistência ( $k$ ) apresentou uma dispersão de 8,3%, enquanto que o coeficiente de encruamento apresentou uma dispersão de 9,0%.

A Figura 50 apresenta a face de fratura do corpo de prova T1. Em (a), observa-se em todo o perímetro a zona de cisalhamento, compreendida entre o retângulo azul e vermelho, demonstrada pela superfície de falha inclinada em relação à seção transversal do corpo de prova, que é característica de um comportamento dúctil durante o ensaio. Esse comportamento é corroborado pelo resultado gráfico do ensaio, no qual é possível observar uma região de deformação plástica substancial para todos os corpos de prova. Ao final dessa região, tem-se o início da zona radial, interna ao retângulo vermelho, com a propagação das trincas em direção ao centro do corpo de prova. Em (b), foi realizada uma avaliação destacada da região central (retângulo amarelo), que corresponde ao final da fratura, em que observa-se uma quantidade elevada de vazios. Essa mesma condição é verificada com a análise da face de fratura do corpo de prova T3, conforme é demonstrado na Figura 51. Nota-se que na mesma região final de fratura (b), o corpo de prova T3 apresenta também uma quantidade elevada de vazios. O alinhamento dessas discontinuidades favorece a propagação da fratura, devido ao campo de tensões gerados.

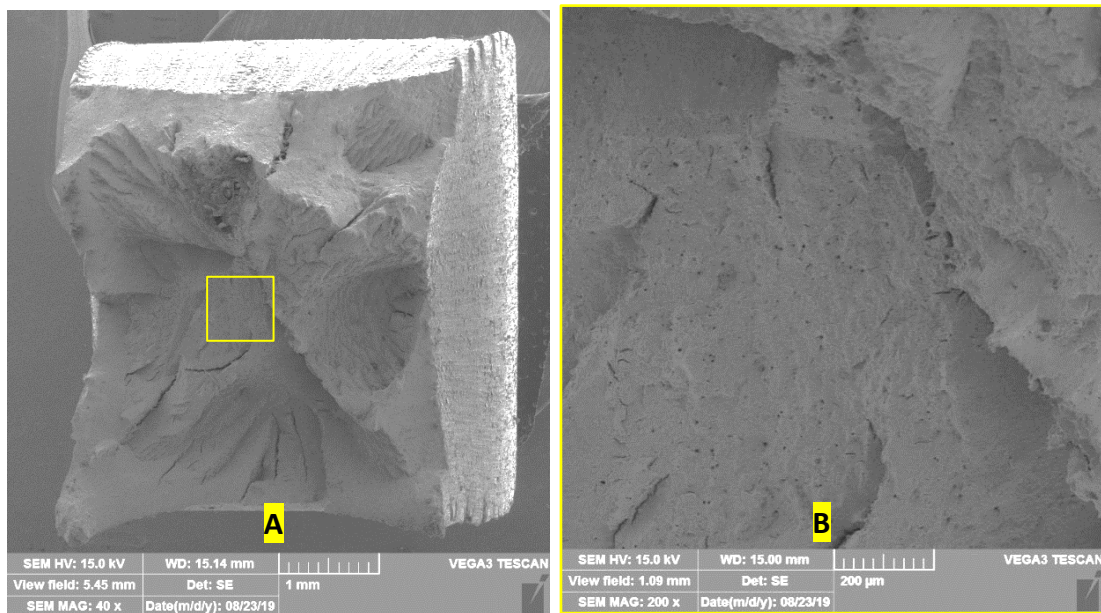
A presença de vazios em todas as amostras certamente influenciou nos valores de tensão máxima e de alongamento registrados fora dos limites determinados por norma. Não foi encontrado nenhuma segregação específica relacionada aos vazios encontrados.

**Figura 50** – Avaliação no MEV da superfície de fratura do corpo de prova de tração T1.



Fonte: O autor. (a) Face de fratura do corpo de prova de tração T1. (b) Destaque da região central, que corresponde ao final da fratura do corpo de prova.

**Figura 51** – Avaliação no MEV da superfície de fratura do corpo de prova de tração T3.

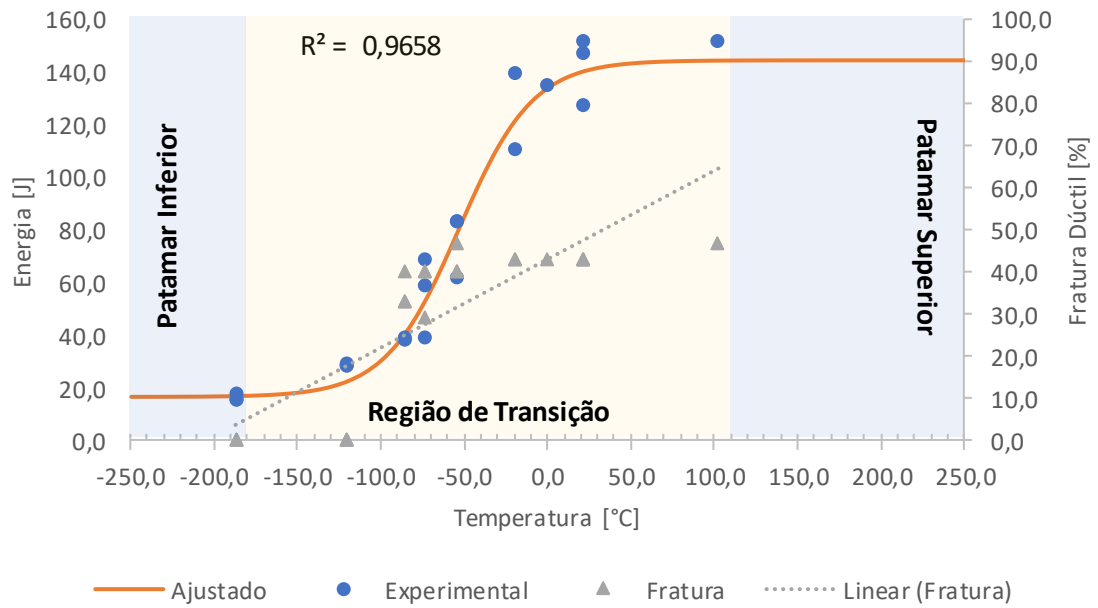


Fonte: O autor. (a) Face de fratura do corpo de prova de tração T3. (b) Destaque da região central, que corresponde ao final da fratura do corpo de prova.

#### 5.4 ENSAIO IMPACTO *CHARPY*

A curva TTDF obtida pelo ensaio de impacto *Charpy* para o material API 5DP *Tool Joint* é ilustrada na Figura 52.

**Figura 52** – Curva TTDF do aço API 5DP *Tool Joint*.



Fonte: O autor.

Os valores de energia absorvida e o percentual de fratura dúctil por temperatura durante o ensaio do aço API 5DP *Tool Joint* constam na Tabela 24 que está no

APÊNDICE C – AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS AMOSTRAS DO ENSAIO DE *IMPACTO CHARPY*, na qual consta uma avaliação detalhada dos mecanismos de dano atuantes nos corpos de prova do ensaio de impacto para a caracterização do patamar a que pertence a TTDF. A Figura 65 desse mesmo anexo apresenta a superfície de fratura dos corpos de prova ensaiados. Alguns apresentam coloração escurecida e pontos de oxidação, devido ao armazenamento inadequado após os ensaios.

A norma API 5DP, que especifica os parâmetros para enquadramento do aço API 5DP *Tool Joint*, determina requisito de 47J para o valor de energia absorvida mínima individualmente por um corpo de prova de 10 x 10 mm, e um valor médio de energia absorvida mínima de 54J, a uma temperatura de teste de 21°C ±3°C. As amostras ensaiadas atendem aos requisitos especificados em norma. Nessa temperatura, o valor de energia absorvida cai na região de transição do comportamento à fratura do corpo de prova, apresentando uma mistura entre o modo de fratura dúctil e frágil.

A partir do valor de 140,5J, correspondente à energia absorvida no ensaio de impacto *Charpy* (CVN) para a curva ajustada à temperatura de 22,0 °C, foi determinado o valor de tenacidade à fratura do material, com base na equação 27 apresentada na Tabela 7. Para uma avaliação comparativa, esses valores foram transformados para o parâmetro de tenacidade  $J_{IC}$ , utilizando a relação da equação 46 (ANDERSON, 2005), considerando o estado plano de deformações.

**Tabela 7** – Valor de tenacidade à fratura a partir do ensaio de Impacto *Charpy*.

Equação Utilizada	Ensaio de Impacto			Ensaio de Tenacidade	Erro
	$K_{IC}$ [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	$J_{IC}$ [MPa.m]	$J_{IC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$J_{IC}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	
$K_{IC} = 8,47(CVN)^{0,63}$	190,950	0,164	163,980	135,190	21,3%

Fonte: O autor.

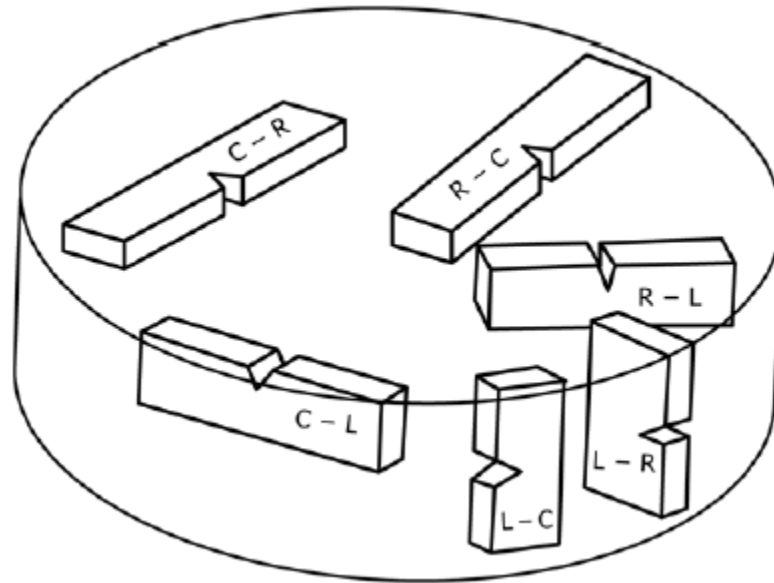
$$J_{IC} = K_{IC}^2(1 - \nu^2)/E, \quad (46)$$

De modo que  $E$  é o módulo de elasticidade do material (MPa) e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson. Foi utilizado o valor médio 208,01 GPa, encontrado nos ensaios realizados neste trabalho, para o módulo de elasticidade do material. Para o coeficiente de Poisson, foi utilizado o valor médio de 0,254 (HAAG, 2015), uma vez que esse parâmetro não foi objeto de avaliação experimental no atual trabalho.

Confrontando o valor calculado de tenacidade  $J_{IC}$  a partir dos resultados do ensaio de impacto realizado neste trabalho (163,980 kJ/m<sup>2</sup>), conforme Tabela 7, com o valor médio de 135,19 kJ/m<sup>2</sup> para tenacidade  $J_{IC}$  obtido através de ensaio de CTOD (HAAG, 2015), identifica-se que o valor encontrado através do ensaio de impacto possui um erro de 21,3% em relação ao valor do ensaio pelo ensaio convencional de tenacidade à fratura. Esse resultado é esperado, uma vez que o ensaio de impacto não traz bons resultados para o parâmetro de tenacidade, pois o entalhe do corpo de prova não representa bem a geometria de uma trinca; o tamanho do corpo de prova não produz uma restrição que seja compatível com o estado de tensão de uma estrutura real e a força de ativação é através de uma carga de impacto, enquanto que, em um ensaio convencional de tenacidade à fratura a carga, é aplicada em uma condição quase estática (ANDERSON, 2005).

Uma ressalva deve ser feita em relação à orientação da remoção do corpo de prova para ensaio de impacto. A norma API 5DP, que especifica os parâmetros para enquadramento do aço API 5DP Tool Joint, determina que a orientação do corpo de prova e a direção do entalhe seja a L-C, conforme ilustrado na Figura 53. Contudo, como o objetivo do ensaio de impacto neste trabalho é a estimativa do valor de tenacidade, comparando esse com o valor de um ensaio de tenacidade convencional, foi utilizada a mesma orientação e direção do trabalho realizado por Haag (2015), que foi o L-R. Existe uma dependência do valor de tenacidade com a orientação do corpo de prova. Entretanto, como visto na Figura 48, não há um eixo preferencial de forjamento no material, devido aos tratamentos térmicos realizados após a conformação mecânica. Assim, não é esperado grandes variações para o valor de energia absorvida entre as orientações L-R e L-C.

**Figura 53** – Orientação do corpo de prova e direção do entalhe para barras e cilindros.



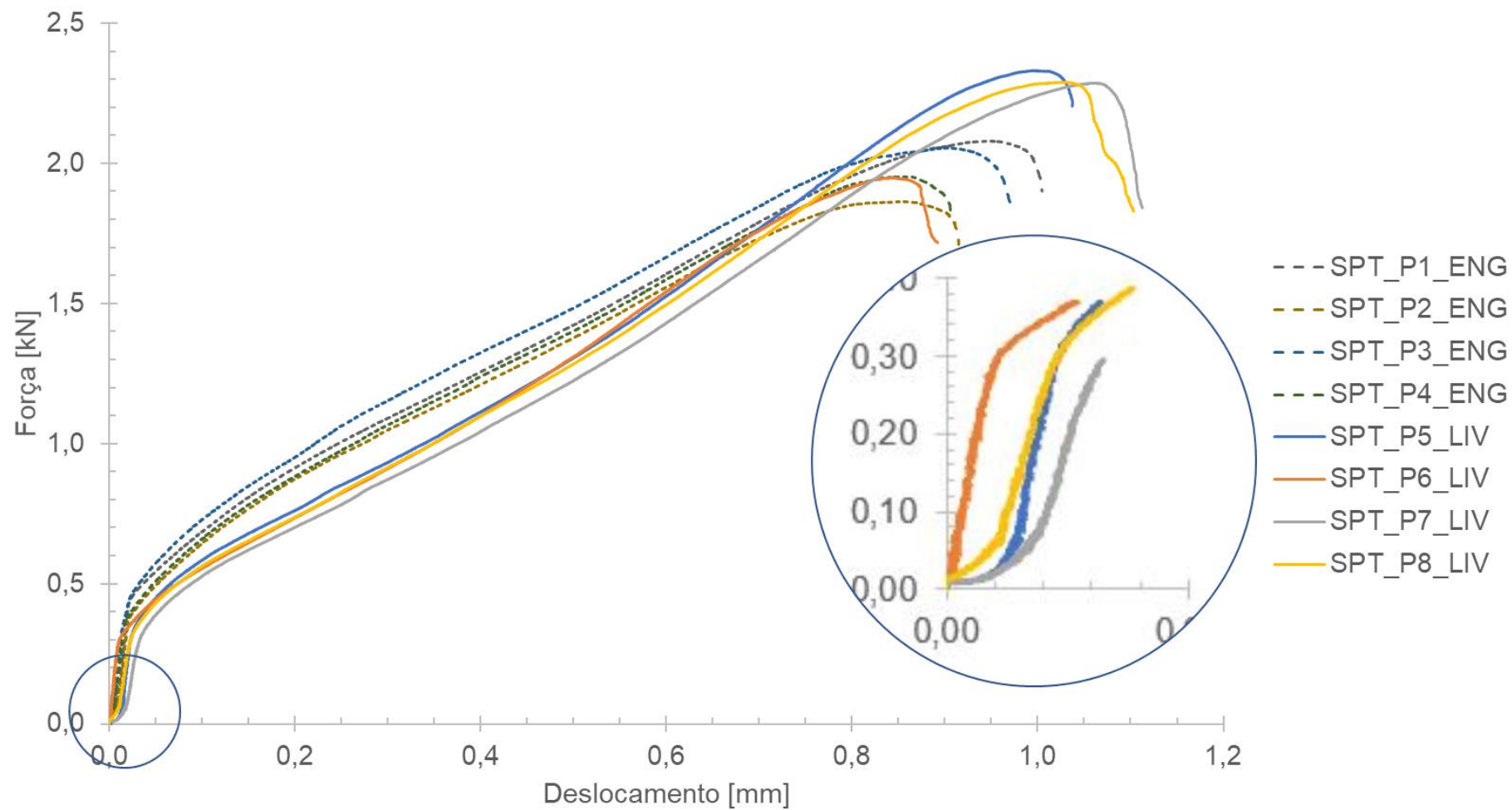
Fonte: (ASTM, 2013).

## 5.5 ENSAIO SPT

A curva de força vs. deflexão do ensaio SPT é ilustrada na Figura 54. Os resultados comprovam que a condição do ensaio, entre livre e engastado, afeta os resultados.



**Figura 54** – Curva Força vs. Deflexão do aço API 5DP Tool Joint para o ensaio SPT.



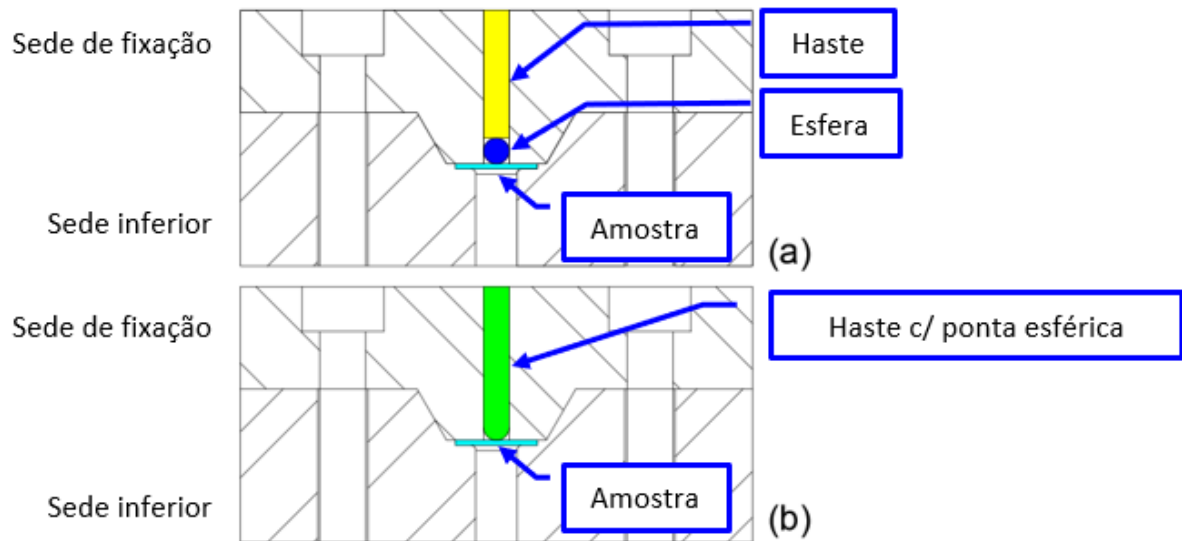
Fonte: O autor. Linha tracejada indica a condição do corpo de prova engastado. Linha contínua indica a condição do corpo de prova livre. Em destaque no círculo apenas a condição livre.

O traçado da curva para a condição engastada está compatível com o esboçado na Figura 23, e nas demais referências mencionadas neste trabalho. É possível observar que a região 1, governada pela deformação elástica, apresenta uma relação linear entre a carga aplicada e a deflexão do corpo de prova, coerente com a lei de Hooke. Já para a condição livre, três das quatro amostras apresentam uma relação não linear. Essa condição também foi observada por LI (LI; CHEN; ARDELL, 1991) em seu trabalho experimental, no qual foi verificado que a região não linear reduz proporcionalmente com o aumento da força de fixação do corpo de prova contra a sede inferior, sendo eliminada quando atingida a condição engastada. Segundo LI, esse comportamento afeta a determinação da carga  $F_e$ , que acaba registrando valores majorados. LI argumenta que esse comportamento se deve ao fato de que a rigidez do conjunto é alterada devido à condição do ensaio. Entretanto, neste trabalho, foi observado o efeito contrário com relação à carga  $F_e$ . A condição livre apresentou uma redução média de 23,6% para carga  $F_e$ .

Entretanto, trabalhos posteriores (LINSE et al., 2008; RASCHE; KUNA, 2015) demonstraram que a execução do ensaio SPT com o corpo de prova livre, sem a utilização de uma sede de fixação, apresenta na região 1 uma relação linear entre a carga aplicada e a deflexão do corpo de prova. Nessa condição, foram obtidos resultados melhores para ligas com comportamento de dúctil para frágil, com maior destaque para ligas com comportamento frágil. Esse ganho deve-se à condição de restrição do corpo de prova, pois para a condição engastada pode-se gerar tensões indesejadas e, em alguns casos, dificultar a propagação radial da fratura, em função da restrição imposta pela fixação ao corpo de prova.

O fato que revela a divergência nos resultados obtidos por LI, Linse, Rasche e este trabalho, é uma aplicação distinta no arranjo do dispositivo de teste. Tanto Li quanto o experimento conduzido neste trabalho utilizaram uma esfera para penetrar o corpo de prova, sendo a força transmitida a essa por meio de uma haste, enquanto que Linse e Kuna utilizaram, como penetrador, uma haste de ponta esférica, como indicado no guia CWA 15627:2007. A Figura 55 ilustra as duas configurações de penetrador.

**Figura 55** – Representação das configurações de penetrador.



Fonte: O autor. (a) Configuração utilizada por Li e pelo autor. (b) configuração utilizada por Linse e Kuna.

A configuração que utiliza para penetrador uma esfera e uma haste traz alguns inconvenientes para o ensaio com corpo de prova na condição livre, os quais podem influenciar nos resultados experimentais. Dentre eles, pode-se destacar o desalinhamento do centro do corpo de prova com a linha de aplicação da força. O ensaio na condição livre foi realizado com um afastamento inicial entre as faces das sedes de 1,0 mm e a utilização dos parafusos de fixação como guia da sede superior. Esse valor de afastamento foi obtido através de ensaios preliminares realizados para avaliar o método de ensaio, cujo perímetro do corpo de prova não ultrapassava essa marca em deslocamento vertical após deformado. Esse valor também está compatível com o posicionamento da esfera (raio de 1,25 mm) dentro do alojamento da sede superior, no qual era esperado que, após o início da penetração da peça pela esfera, formando uma indentação (marca mecânica), a concentricidade dos elementos seria mantida durante o ensaio. Contudo, conforme os dados da Tabela 8, pode-se verificar que houve uma excentricidade da região de penetração da esfera causada pelo desvio do ponto central de aplicação da força para ambas condições de ensaio, sendo que para o ensaio realizado na condição livre, esse apresentou uma excentricidade média 6,0 vezes maior que a condição engastada.

**Tabela 8** – Excentricidade da indentação nos corpos de prova do ensaio SPT.

Corpo de prova	Excentricidade [mm]
SPT_P1_ENG	0,01
SPT_P2_ENG	0,05
SPT_P3_ENG	0,05
SPT_P4_ENG	0,06
Média	0,04
Desvio Padrão	0,02
SPT_P5_LIV	0,25
SPT_P6_LIV	0,13
SPT_P7_LIV	0,35
SPT_P8_LIV	0,22
Média	0,24
Desvio Padrão	0,09

Fonte: O autor.

Nessa condição, a região inicial da curva do ensaio SPT é fortemente influenciada por efeitos não lineares decorrentes do estado de carregamento em que o corpo de prova é submetido. O APÊNDICE E – MEDIÇÃO DA EXCENTRICIDADE DA INDENTAÇÃO DO CORPO DE PROVA DO ENSAIO SPT, apresenta as medições realizadas da excentricidade. Foi tomado como referência o perímetro externo do corpo de prova e a região de fratura provocada pela penetração da esfera metálica. Para avaliar o efeito do afastamento de 1,0 mm imposto como condição inicial para o ensaio com o corpo de prova livre, foram realizados alguns ensaios sem afastamento entre as faces das sedes, tendo os parafusos de fixação sem torque funcionando apenas como guia. Foi observado o mesmo comportamento não linear na região 1 da curva carga vs. deflexão.

Comparando os valores de excentricidade da Tabela 8 com o comportamento das curvas carga vs. deflexão ilustrados na Figura 54, em que há destaque para o início das curvas dos corpos de prova testados na condição livre, é possível observar uma correlação entre a redução da curvatura na região 1 para a condição de ensaio livre com o decréscimo da excentricidade registrada após o teste. Para o corpo de prova SPT\_P7\_LIV, tem-se a excentricidade e a curvatura máxima; e, para o corpo de prova SPT\_P6\_LIV, tem-se a excentricidade mínima e uma relação linear na região 1 da curva, indicando assim um possível limite para a excentricidade durante o ensaio.

O guia CWA 15627:2007 não faz referência a tratamento de dados para uma relação não linear na região elástica, nem a um valor de tolerância para a excentricidade da indentação.

Neste trabalho, foi desconsiderada a parte não linear da curva das amostras ensaiadas na condição livre para a determinação e o ajuste da função  $f(u_a)$  e para a identificação da carga  $F_e$  – uma vez que os dados dessa região implicariam na determinação da inclinação da reta de ajuste. As funções de ajuste para a obtenção das retas, utilizando a regressão linear, foram produzidas conforme o procedimento exposto no guia europeu CWA 15627:2007.

A Tabela 9 apresenta os intervalos de deflexão (deslocamento da parte central do corpo de prova durante o ensaio SPT) utilizados para o ajuste das retas. Para maximizar o coeficiente de correlação, não é possível utilizar um valor fixo de intervalo para todas as curvas. Na função  $f(u_a)$ , para a condição engastada, foram utilizados os pontos a partir da origem dos eixos, uma vez que o comportamento nessa região é linear. Já para a condição livre, devido à relação não linear inicialmente apresentada pela curva do ensaio, foram utilizados intervalos desconsiderando essa singularidade, exceto para o corpo de prova SPT\_P6\_LIV, que apresentou uma relação linear na região inicial do gráfico ilustrado na figura 54. Para o valor final da função  $f(u_b)$ , foi utilizado o recomendado pelo guia CWA 15627:2007, que é o valor da espessura inicial do corpo de prova ( $h_0$ ) 0,5 mm. Para os corpos de prova SPT\_P6 e P7\_LIV, o valor não foi exatamente 0,5 mm devido ao intervalo de aquisição de dados.

**Tabela 9** – Intervalo utilizado para ajuste das funções  $f(u_a)$  e  $f(u_b)$ .

Corpo de prova	$u_{ai}$ [mm]	$u_{af}$ [mm]	$u_{bi}$ [mm]	$u_{bf}$ [mm]
SPT_P1_ENG	0,00000	0,03594	0,06281	0,50000
SPT_P2_ENG	0,00000	0,02688	0,06063	0,50000
SPT_P3_ENG	0,00000	0,02156	0,05688	0,50000
SPT_P4_ENG	0,00000	0,01563	0,05625	0,50000
SPT_P5_LIV	0,01594	0,02313	0,05031	0,50000
SPT_P6_LIV	0,00375	0,01125	0,03000	0,49906
SPT_P7_LIV	0,02094	0,02875	0,05656	0,49969
SPT_P8_LIV	0,01250	0,02250	0,04781	0,50000

Fonte: O autor.  $u_{ai}$  = valor inicial de deslocamento para a função  $f(u_a)$ ;  $u_{af}$  = valor final de deslocamento para a função  $f(u_a)$ ;  $u_{bi}$  = valor inicial de deslocamento para a função  $f(u_b)$ ;  $u_{bf}$  = valor final de deslocamento para a função  $f(u_b)$ .

A influência causada pela excentricidade, pela rigidez dos elementos, pela sensibilidade de medição e por outros ruídos iniciais sobre os dados da região 1, pode ser avaliada também pela dispersão dos dados no ajuste da curva para a função  $f(u_a)$  em relação aos dados da função  $f(u_b)$ , com os quais é possível notar uma maior aderência dos valores, conforme apresentado na Tabela 10.

**Tabela 10** – Avaliação do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para determinação das retas de ajuste da curva do ensaio SPT e determinação da carga  $F_e$ .

Corpo de Prova	$f(u_a)$	$f(u_b)$
SPT_P1_ENG	0,9501	0,9933
SPT_P2_ENG	0,9412	0,9924
SPT_P3_ENG	0,9674	0,9926
SPT_P4_ENG	0,9719	0,9978
Média	0,9577	0,9940
Desvio Padrão	0,0145	0,0026
SPT_P5_LIV	0,9727	0,9986
SPT_P6_LIV	0,9583	0,9989
SPT_P7_LIV	0,9750	0,9990
SPT_P8_LIV	0,9853	0,9991
Média	0,9728	0,9989
Desvio Padrão	0,0111	0,0002

Fonte: O autor.  $F(u_a)$  = Função da reta de ajuste dos pontos situados na região 1.  $F(u_b)$  = Função da reta de ajuste dos pontos situados na região 2.

Para a condição engastada, a região inicial apresenta uma dispersão dos dados de aproximadamente 6,0 vezes o valor da região 2. Essa situação é agravada na condição livre, devido à excentricidade, de tal modo que observa-se uma dispersão de aproximadamente 59 vezes entre as regiões 1 e 2.

Os valores de  $F_e$  para os três métodos utilizados estão apresentados na Tabela 11. Como ilustrado na Figura 25, a ordem de grandeza entre os três métodos é observada também nos valores encontrados, sendo  $F_{e_{h_0/10}} > F_{e_{MAO}} > F_{e_{CEN}}$ .

**Tabela 11** – Resultados do ensaio SPT para carga  $F_e$ .

Corpo de Prova	$F_{e_{MAO}}$ [kN]	$u_{e_{MAO}}$ [mm]	$F_{e_{CEN}}$ [kN]	$u_{e_{CEN}}$ [mm]	$F_{e_{h_0/10}}$ [kN]	$u_{e_{h_0/10}}$ [mm]	$h_0$ [mm]
SPT_P1_ENG	0,582	0,033	0,486	0,033	0,693	0,093	0,536
SPT_P2_ENG	0,530	0,026	0,402	0,026	0,637	0,085	0,531
SPT_P3_ENG	0,598	0,024	0,460	0,024	0,712	0,083	0,540
SPT_P4_ENG	0,529	0,023	0,397	0,023	0,639	0,081	0,533
Média	0,560	0,026	0,436	0,026	0,670	0,085	0,535
Desvio Padrão	0,035	0,004	0,044	0,004	0,038	0,005	0,004
SPT_P5_LIV	0,449	0,028	0,351	0,028	0,553	0,086	0,539
SPT_P6_LIV	0,384	0,013	0,314	0,013	0,490	0,070	0,531
SPT_P7_LIV	0,413	0,037	0,329	0,037	0,514	0,095	0,529
SPT_P8_LIV	0,425	0,029	0,342	0,029	0,531	0,087	0,532
Média	0,418	0,027	0,334	0,027	0,522	0,084	0,533
Desvio Padrão	0,027	0,010	0,016	0,010	0,027	0,010	0,004

Fonte: O autor.

### 5.5.1 Determinação da tensão de escoamento

Inicialmente, com base na equação 35, foram avaliados os resultados da aplicação dos coeficientes encontrados por Mao e Takahashi (1987), onde  $\alpha_1 = 360,0$  e  $\alpha_2 = 0,0$ , tendo sido utilizado o valor médio encontrado para o parâmetro de escoamento do ensaio SPT ( $F_e/h_0^2$ ) para os três métodos de determinação da carga  $F_e$  ( $F_{e_{h_0/10}}$ ;  $F_{e_{MAO}}$ ;  $F_{e_{CEN}}$ ). Os valores encontrados foram registrados na Tabela 12.

**Tabela 12** – Determinação da tensão de escoamento utilizando parâmetros proposto por Mao.

Condição do corpo de prova	Parâmetro de Escoamento SPT	$F_e/h_0^2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$S_{y\_Convencional}$ [MPa]	$S_{y\_SPT}$ [MPa]	Erro
<b>Engastado</b>	$F_{e_{h_0/10}}/h_0^2$	2,342	360,0	0,0	832,7	843,2	1,3%
	$F_{e_{MAO}}/h_0^2$	1,957	360,0	0,0	832,7	704,4	-15,4%
	$F_{e_{CEN}}/h_0^2$	1,525	360,0	0,0	832,7	548,9	-34,1%
<b>Livre</b>	$F_{e_{h_0/10}}/h_0^2$	1,840	360,0	0,0	832,7	662,5	-20,4%
	$F_{e_{MAO}}/h_0^2$	1,473	360,0	0,0	832,7	530,2	-36,3%
	$F_{e_{CEN}}/h_0^2$	1,178	360,0	0,0	832,7	424,2	-49,1%

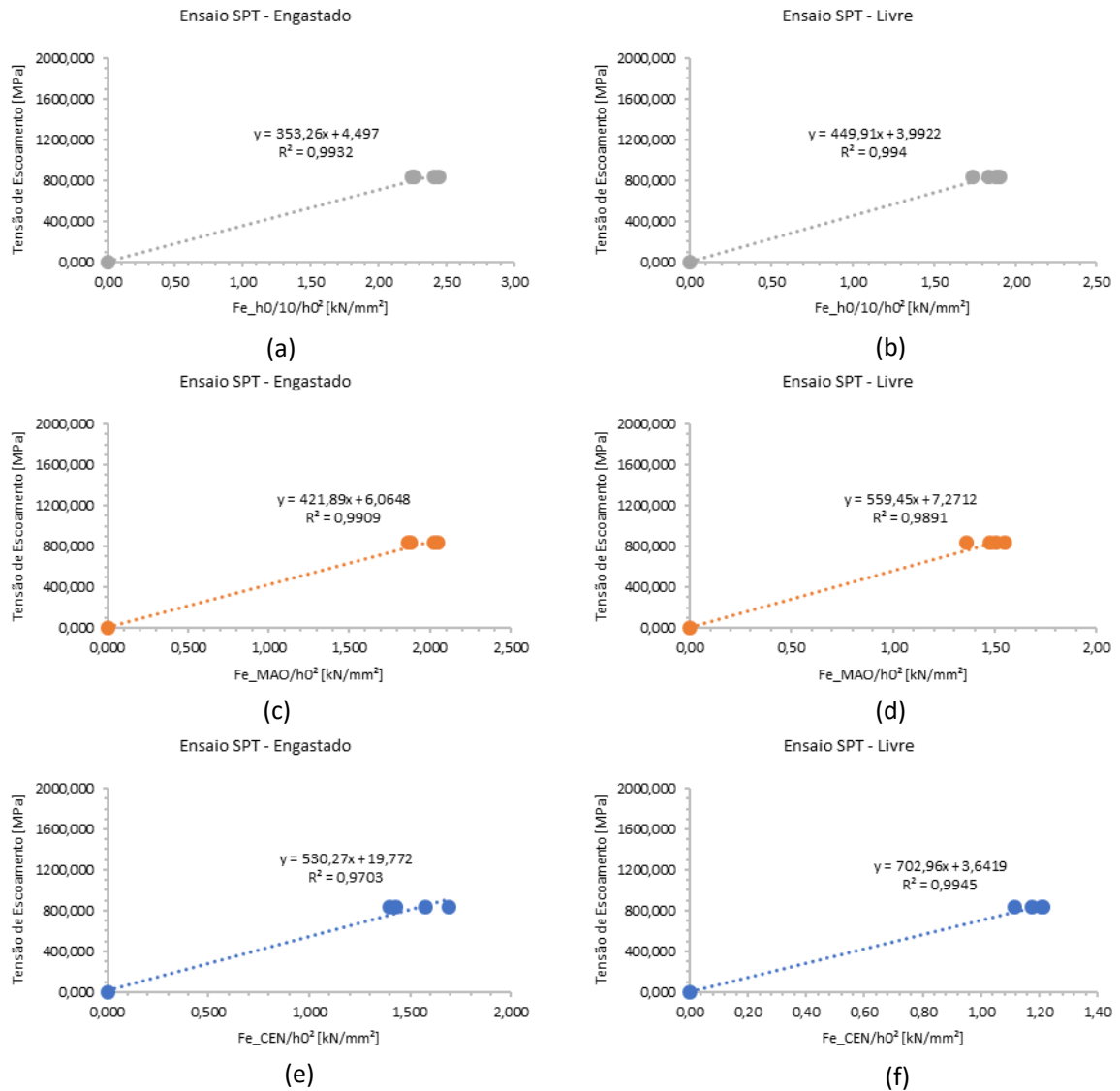
Fonte: O autor.

Observa-se que o melhor resultado encontrado foi com o método  $F_{e_{h_0/10}}$  para determinar a carga relacionada ao escoamento, cujo erro, em relação ao valor médio do ensaio de tração convencional realizado neste trabalho para a condição engastada, é de 1,3%, e para a condição livre é de -20,4%. Utilizando integralmente a metodologia de Mao (1987), o resultado encontrado apresenta um erro de -15,4% para a condição engastada e de -36,3% para a condição livre.

Desse modo, foi avaliado qual dos três métodos de determinação da carga  $F_e$  ( $F_{e_{h_0/10}}$ ;  $F_{e_{MAO}}$ ;  $F_{e_{CEN}}$ ) apresenta a melhor aderência aos dados encontrados nesta pesquisa. Para isso, foi plotado o valor médio da tensão de escoamento do material, determinado pelo ensaio de tração convencional, contra os parâmetros de escoamento do ensaio SPT ( $F_e/h_0^2$ ) para cada método de obtenção da carga  $F_e$  ( $F_{e_{h_0/10}}$ ;  $F_{e_{MAO}}$ ;  $F_{e_{CEN}}$ ). A Figura 56 apresenta os resultados encontrados. Como foi testado experimentalmente apenas um material neste trabalho, para ajuste dos valores, utilizou-se a origem do gráfico como parte dos dados. Para a condição engastada, observa-se o mesmo comportamento da ordem de grandeza para o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre os três métodos, sendo,  $F_{e_{h_0/10}} > F_{e_{MAO}} > F_{e_{CEN}}$ . Para a condição livre,

o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) entre os três métodos  $F_{e_{h_0/10}}$  e  $F_{e_{CEN}}$ , apresenta praticamente o mesmo resultado, sendo maior que  $F_{e_{MAO}}$ .

**Figura 56** – Avaliado da relação entre o parâmetro de escoamento  $F_e/h_0^2$  do ensaio SPT e a tensão de escoamento do material obtido pelo ensaio convencional de tração.



Fonte: O autor. (a) Relação entre  $\sigma_y$  e  $F_e/h_0^2$  para condição engastada, onde  $F_e = F_{e_{h_0/10}}$ . (b) Relação entre  $\sigma_y$  e  $F_e/h_0^2$  para condição livre, onde  $F_e = F_{e_{h_0/10}}$ . (c) Relação entre  $\sigma_y$  e  $F_e/h_0^2$  para condição engastada, onde  $F_e = F_{e_{MAO}}$ . (d) Relação entre  $\sigma_y$  e  $F_e/h_0^2$  para condição livre, onde  $F_e = F_{e_{MAO}}$ . (e) Relação entre  $\sigma_y$  e  $F_e/h_0^2$ , para condição engastada, onde  $F_e = F_{e_{CEN}}$ . (f) Relação entre  $\sigma_y$  e  $F_e/h_0^2$ , para condição livre, onde  $F_e = F_{e_{CEN}}$ .

Na sequência, com base na equação 35, foram avaliados os resultados da aplicação dos coeficientes encontrados pelo ajuste das retas, ilustrados na Figura 56, para determinar o valor da tensão de escoamento do material, tendo sido utilizado o valor médio encontrado para o parâmetro de escoamento do ensaio SPT ( $F_e/h_0^2$ ) para os três métodos de determinação da carga  $F_e$  ( $F_{e_{h_0/10}}$ ;  $F_{e_{MAO}}$ ;  $F_{e_{CEN}}$ ). Os resultados são apresentados na Tabela 13.



**Tabela 13** – Determinação da tensão de escoamento utilizando os coeficientes ajustados pelo autor.

Condição do corpo de prova	Parâmetro de Escoamento SPT	$F_e/h_0^2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$S_{y\_Convencional}$ [MPa]	$S_{y\_SPT}$ [MPa]	Erro
<b>Engastado</b>	$F_{e\_h_0/10}/h_0^2$	2,342	353,3	4,5	832,7	831,9	-0,1%
	$F_{e\_MAO}/h_0^2$	1,957	421,9	6,1	832,7	831,6	-0,1%
	$F_{e\_CEN}/h_0^2$	1,525	530,3	19,8	832,7	828,3	-0,5%
<b>Livre</b>	$F_{e\_h_0/10}/h_0^2$	1,840	449,9	4,0	832,7	831,9	-0,1%
	$F_{e\_MAO}/h_0^2$	1,473	559,5	7,3	832,7	831,2	-0,2%
	$F_{e\_CEN}/h_0^2$	1,178	703,0	3,6	832,7	832,0	-0,1%

Fonte: O autor.

Observa-se que os melhores resultados encontrados, simultaneamente para a condição engastada e livre, foram para o método  $F_{e\_h_0/10}$ . Em ambos os casos, o valor determinado para a tensão de escoamento, através do ensaio SPT, apresentou um erro de -0,1% em relação ao valor médio da tensão de escoamento encontrado no ensaio de tração convencional realizado neste trabalho. Para a condição engastada, o coeficiente angular encontrado,  $\alpha_1 = 353,26$ , é próximo ao encontrado por Mao,  $\alpha_1 = 360,0$ . A pequena diferença observada para a correlação entre os dados obtidos neste trabalho e os propostos por Mao, na condição engastada, pode ser atribuída ao fato de que, no experimento realizado por Mao, foram utilizados materiais com diferentes características mecânicas e metalúrgicas (Aço carbono, aço inoxidável, liga de cobre), levando à obtenção de coeficientes que se ajustassem melhor a uma dispersão maior de dados.

Neste trabalho, foi utilizado apenas um tipo de material para o ajuste dos dados e para a obtenção da reta, sendo considerado a origem dos eixos cartesianos um ponto da função. Essa escolha limita o número de fatores de influência na dispersão dos dados encontrados.

Outro ponto a ser considerado é que o coeficiente linear utilizado por Mao foi zero. Neste trabalho, foi utilizada a formulação para o melhor ajuste da reta, assim, o coeficiente linear dos métodos é diferente de zero.

Outros autores (CONTRERAS et al., 2008; GARCÍA et al., 2014) concluíram também que o método que promove os melhores resultados para estimar a tensão de escoamento do material é o  $F_{e\_h_0/10}$ , utilizando coeficientes distintos dos encontrados neste trabalho. A Tabela 14 apresenta os valores obtidos com o uso desses coeficientes para a determinação da tensão de escoamento do aço API 5DP Tool Joint, utilizando o valor de  $F_e/h_0^2$ , obtido através do ensaio SPT neste trabalho.

**Tabela 14** – Determinação da tensão de escoamento utilizando parâmetros ajustados por diferentes publicações.

Referência	Material Testado	S <sub>y</sub> _Convenciona 1 Material Testado [MPa]	F <sub>e</sub> /h <sub>0</sub> <sup>2</sup> [kN/mm <sup>2</sup> ]	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	S <sub>y</sub> _Convenciona 1 API 5DP Tool Joint [MPa]	S <sub>y</sub> _SPT API 5DP Tool Joint [MPa]	Erro
(CONTRERA S et al., 2008)	AE460: Aço estrutural microligado, com estrutura ferrítico-perlítico, na condição como laminado a quente.	515,0	2,342	268,0	207,0	832,7	834,7	0,2%
(MAO; TAKAHASHI, 1987)	Aços estruturais: HT-60; HT-9; A533B; A508 Aços inoxidáveis: PCA; SS316; SS304	548,5 ± 121,5 237,3 ± 26,4	1,957	360,0	0,0	832,7	704,5	-15,4%
(GARCÍA et al., 2014)	Aços de Alta Resist.: Eurofer 1/2; AR; CrMoV 1/2/3/4 Aços estruturais: DP 1/2/3/4; S460; API X70 Aços inoxidáveis: AISI 304; D2205 Liga de alumínio: Al2024	753,0 ± 276,0 533,0 ± 81,4 489,0 ± 114,6 324,0	2,342	346,0	0,0	832,7	810,4	-2,7%

Fonte: O autor. Corpos de prova testados na condição engastada.

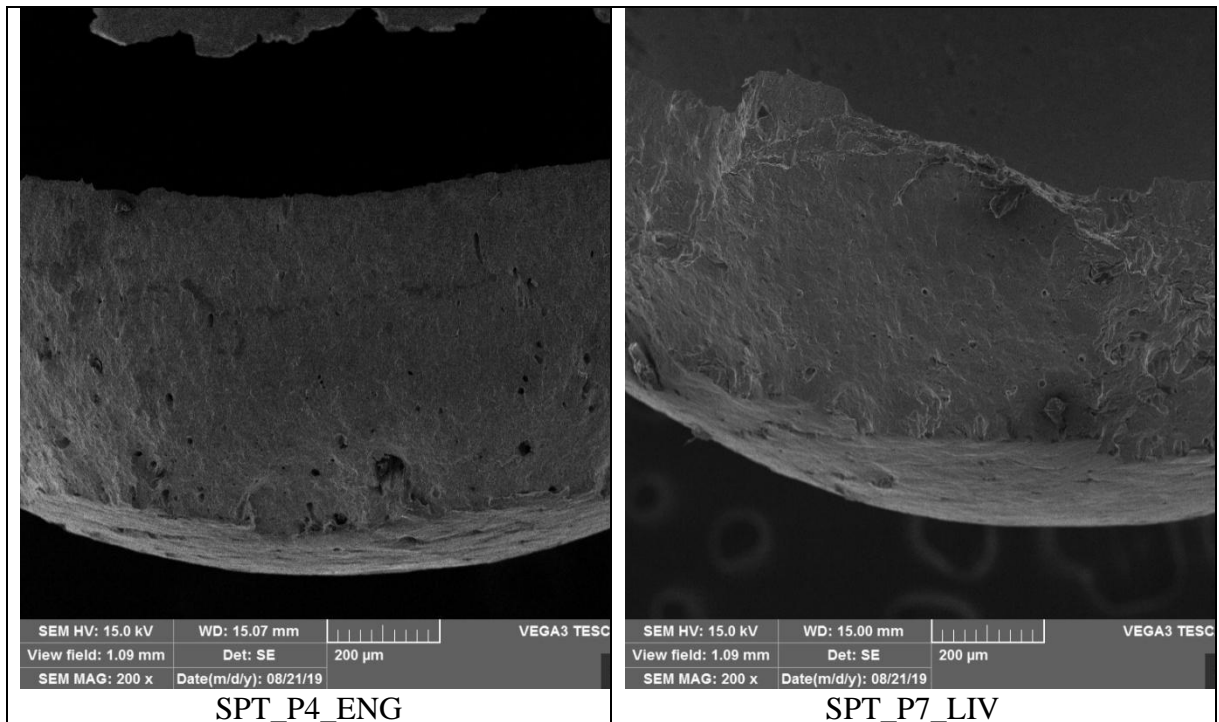
Observa-se que CONTRERAS et al. (2008) utilizou apenas um material, com características microestruturais distintas do usado neste trabalho, e que tem a tensão de escoamento 38,1% menor do que o aço API 5DP Tool Joint, apresentando um erro de 0,2% na determinação do seu valor de escoamento. Das suas análises, foram encontrados os coeficientes  $\alpha_1 = 268,0$  e  $\alpha_2 = 207,0$ , que se afastam dos observados neste trabalho e dos constatados por Mao (1987). GARCÍA et al. (2014), por sua vez, utiliza uma gama variada de materiais, tendo esses um valor médio de 610,7 MPa, 26,7% menor do que o aço API 5DP Tool Joint, apresentando um erro de 6,9% na determinação do valor do aço API 5DP Tool Joint. Apesar dos experimentos de García (2014) e de Mao (1987) apresentarem uma diversidade de materiais que se assemelham, a tensão de escoamento média do trabalho de Mao (1987) foi de 415,1 MPa, 50,1%, menor do que o aço API 5DP Tool Joint, e, utilizando o método  $F_{e_{h_0/10}}$ , com os coeficientes  $\alpha_1 = 360,0$  e  $\alpha_2 = 0,0$ , o erro encontrado para a determinação do escoamento do aço API 5DP Tool Joint foi de 1,3%, conforme atesta a tabela 12.

Nota-se que a classe de resistência e o número de distintos materiais de amostras, utilizados durante o ensaio, influenciam diretamente os valores dos coeficientes de ajuste, embora esses, quando utilizados para a determinação da tensão de escoamento do material, produzam pequenos erros.

Ratificando  $F_{e_{h_0/10}}$  como valor de  $F_e$ , Moreno (2018) apresentou uma abordagem energética, que, através de ensaios SPT utilizando um método de descarregamento sistêmico dos corpos de prova, pode determinar a energia de deformação elástica e plástica para as amostras, encontrando valores para  $F_e$  próximos do método  $F_{e_{h_0/10}}$ . Porém, já há estudo (JANČA; SIEGL; HAUŠILD, 2016) que argumenta acerca da existência da plastificação do material com carga quase 5,0 vezes menor que a carga  $F_{e_{CEN}}$ .

### 5.5.2 Determinação da tensão máxima

Observa-se, no gráfico da Figura 54, que os corpos de prova na condição livre registraram uma carga máxima superior aos corpos de prova na condição engastada, com exceção do corpo de prova SPTP6\_LIV. Todos os corpos de prova do ensaio SPT apresentam vazios na região de fratura, conforme ilustrado na Figura 57. Essa mesma condição já foi apresentada e discutida no resultado do ensaio de tração, expondo suas consequências.

**Figura 57** – Avaliação da face de fratura dos corpos de prova do ensaio SPT.

Fonte: O autor.

Em média, o incremento na carga máxima foi de 11,3% da condição livre em relação à condição engastada, sendo o comportamento contrário observado na deflexão, apresentando uma redução de 10,3% na deformação dos corpos de prova. Os dados de carga máxima das curvas carga vs. deflexão ensaiados foram registrados na Tabela 15, na qual,  $F_m$  e  $u_m$  são obtidos a partir dos valores gráficos, e  $h_0$  é a espessura inicial do corpo de prova.

**Tabela 15** – Resultados do ensaio SPT para carga  $F_m$ .

Corpo de Prova	$F_m$ [kN]	$u_m$ [mm]	$h_0$ [mm]
SPT_P1_ENG	2,080	0,951	0,536
SPT_P2_ENG	1,864	0,856	0,531
SPT_P3_ENG	2,055	0,902	0,540
SPT_P4_ENG	1,952	0,855	0,533
Média	1,988	0,891	0,535
Desvio Padrão	0,099	0,046	0,004
SPT_P5_LIV	2,332	0,999	0,539
SPT_P6_LIV	1,948	0,843	0,531
SPT_P7_LIV	2,287	1,064	0,529
SPT_P8_LIV	2,290	1,027	0,532
Média	2,214	0,983	0,533
Desvio Padrão	0,178	0,098	0,004

Fonte: O autor.

Utilizando-se da equação 36, foi avaliada a resposta do valor médio encontrado para os parâmetros de tensão máxima do ensaio SPT ( $F_m/h_0^2$ ,  $F_m/h_0$  e  $F_m/(h_0.u_m)$ ), com o uso dos coeficientes propostos por Mao (MAO; TAKAHASHI, 1987), onde  $\beta_1 = 130,0$  e  $\beta_2 = -320,0$ . Os valores encontrados foram registrados na Tabela 16.

**Tabela 16** – Determinação da tensão máxima utilizando os coeficientes propostos por Mao.

Condição do corpo de prova	Parâmetro de Ten. Máxima SPT	$F_m/h_0^2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_1$	$\beta_2$	$S_{u\_Convencional}$ [MPa]	$S_{u\_SPT}$ [MPa]	Erro
<b>Engastado</b>	$F_m/h_0^2$	6,949	130,0	-320,0	947,8	583,3	-38,5%
	$F_m/(h_0.u_m)$	4,170	130,0	-320,0	947,8	222,1	-76,6%
	$F_m/h_0$	3,716	130,0	-320,0	947,8	163,1	-82,8%
<b>Livre</b>	$F_m/h_0^2$	7,805	130,0	-320,0	947,8	694,6	-26,7%
	$F_m/(h_0.u_m)$	4,228	130,0	-320,0	947,8	229,6	-75,8%
	$F_m/h_0$	4,157	130,0	-320,0	947,8	220,4	-76,7%

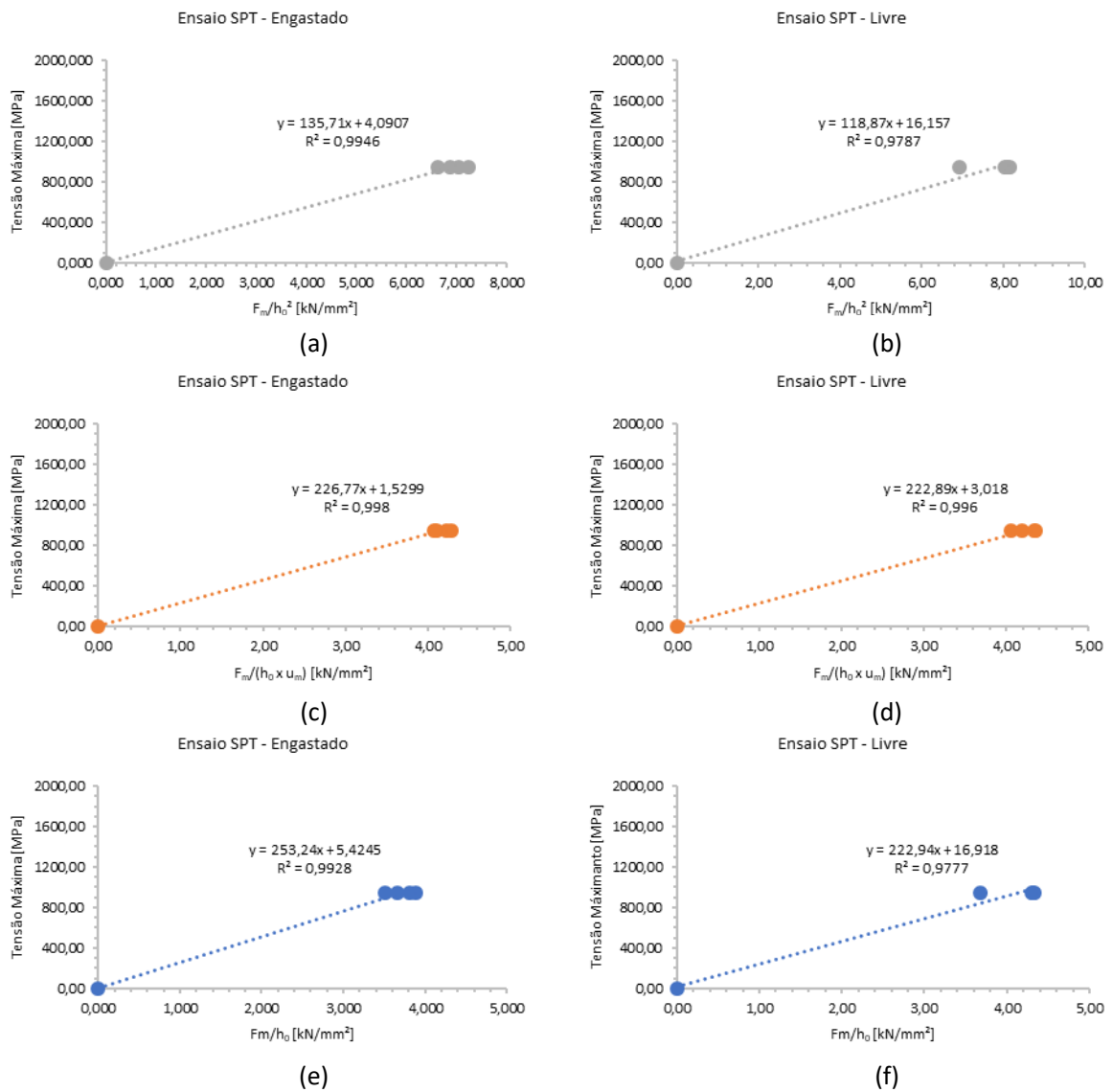
Fonte: O autor.

Observa-se que o melhor resultado encontrado foi o método  $F_m/h_0^2$ , para determinar a carga relacionada à tensão máxima do material, cujo erro, em relação ao valor médio do ensaio de tração convencional realizado neste trabalho para a condição engastada, é de -38,5%, e para a condição livre é de -26,7%, em que ambos correspondem à metodologia de Mao.

Na sequência, foi avaliado qual dos três métodos de determinação do parâmetro de tensão máxima do ensaio SPT ( $F_m/h_0^2$ ,  $F_m/h_0$  e  $F_m/(h_0.u_m)$ ) apresenta a melhor aderência aos dados encontrados neste trabalho. Para isso, foram plotados o valor médio da tensão máxima do material determinado pelo ensaio de tração convencional contra os parâmetros de tensão máxima do ensaio SPT. A

**Figura 58** apresenta os resultados encontrados. Como foi testado experimentalmente apenas um material neste trabalho, para ajuste dos valores, foi utilizada a origem do gráfico como parte dos dados. Para a condição engastada, o parâmetro  $F_m/h_0^2$  apresenta o melhor coeficiente de correlação ( $R^2$ ), enquanto que para a condição livre é o parâmetro  $F_m/(h_0.u_m)$ .

**Figura 58** – Avaliado da relação entre o parâmetro de tensão máxima  $F_m/h_0^2$  do ensaio SPT e a tensão máxima do material obtido pelo ensaio convencional de tração.



Fonte: O autor. (a) Relação entre  $\sigma_{uts}$  e  $F_m/h_0^2$  para condição engastada. (b) Relação entre  $\sigma_{uts}$  e  $F_m/h_0^2$  para condição livre. (c) Relação entre  $\sigma_{uts}$  e  $F_m/(h_0 \cdot u_m)$  para condição engastada. (d) Relação entre  $\sigma_{uts}$  e  $F_m/(h_0 \cdot u_m)$  para condição livre. (e) Relação entre  $\sigma_{uts}$  e  $F_e/h_0$  para condição engastada. (f) Relação entre  $\sigma_{uts}$  e  $F_e/h_0$  para condição livre.

Uma vez avaliados os coeficientes de correlação, utilizando-se da equação 36, foram analisados os resultados da aplicação dos coeficientes encontrados pelo ajuste das retas, ilustrados na

**Figura 58**, visando determinar o valor da tensão máxima do material. Os resultados são apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17** – Determinação da tensão máxima utilizando os coeficientes ajustados pelo autor.

Condição do corpo de prova	Parâmetro de Ten. Máxima SPT	$F_m/h_0^2$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_1$	$\beta_2$	$S_{u\_Convencional}$ [MPa]	$S_{u\_SPT}$ [MPa]	Erro
<b>Engastado</b>	$F_m/h_0^2$	6,949	135,7	4,1	947,8	947,1	-0,1%
	$F_m/(h_0 \cdot u_m)$	4,170	226,8	1,5	947,8	947,1	-0,1%
	$F_m/h_0$	3,716	253,2	5,4	947,8	946,6	-0,1%
<b>Livre</b>	$F_m/h_0^2$	7,805	118,9	16,2	947,8	943,9	-0,4%
	$F_m/(h_0 \cdot u_m)$	4,228	222,9	3,0	947,8	945,3	-0,3%
	$F_m/h_0$	4,157	222,9	16,9	947,8	943,7	-0,4%

Fonte: O autor.

Os coeficientes encontrados para todas as retas ajustadas apresentaram bons resultados, variando o erro entre -0,1% e -0,4%. Dessa forma, foi ratificado o uso do parâmetro  $F_m/(h_0 \cdot u_m)$  para determinação da tensão máxima, pois apresenta o melhor coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a condição engastada, assim como o encontrado no trabalho de Garcia (GARCÍA et al., 2014).

No mesmo estudo realizado para o escoamento, Contreras et al. (2008) e García et al. (2014) concluíram que o método que promove os melhores resultados para estimar a tensão máxima do material através do ensaio SPT, é o  $F_m/(h_0 \cdot u_m)$ , utilizando-se de coeficientes distintos dos encontrados neste trabalho. A Tabela 18 apresenta os valores obtidos com o uso desses coeficientes para a determinação da tensão máxima do aço API 5DP Tool Joint, utilizando o valor de  $F_m/(h_0 \cdot u_m)$ , obtido através do ensaio SPT neste trabalho.



**Tabela 18** – Determinação da tensão máxima utilizando parâmetros ajustados por diferentes publicações.

Referência	Material Testado	S <sub>uts_Convencional</sub> Material Testado [MPa]	F <sub>m</sub> /h <sub>0</sub> <sup>2</sup> [kN/mm <sup>2</sup> ]	β <sub>1</sub>	β <sub>2</sub>	S <sub>uts_Convencional</sub> API 5DP Tool Joint [MPa]	S <sub>uts_SPT</sub> API 5DP Tool Joint [MPa]	Erro
(CONTRERAS et al., 2008)	AE460: Aço estrutural microligado, com estrutura ferrítico-perlítico, na condição como laminado a quente.	662,0	6,949	51,0	269,0	947,8	623,4	-34,2%
(MAO; TAKAHASHI, 1987)	Aços estruturais: HT-60; HT-9; A533B; A508 Aços inoxidáveis: PCA; SS316; SS304	548,5 ± 121,5 237,3 ± 26,4	6,949	130,0	-320,0	947,8	583,3	-38,5%
(GARCÍA et al., 2014)	Aços de Alta Resistência: Eurofer 1/2; AR; CrMoV 1/2/3/4 Aços estruturais: DP 1/2/3/4; S460; API X70 Aços inoxidáveis: AISI 304; D2205 Liga de alumínio: Al2024	874,4 ± 272,7 809,5 ± 129,4 765,0 ± 63,6 469,0	6,949	277,0	0,0	947,8	1924,8	103,1%

Fonte: O autor. Corpos de prova testados na condição engastada.

Observa-se que CONTRERAS et al. (2008) utilizou apenas um material com características microestruturais distintas do usado neste trabalho, e que tem a tensão máxima 30,2% menor do que o aço API 5DP Tool Joint, apresentando um erro de -34,2% na determinação do seu valor de tensão máxima para o ensaio SPT. Nas suas análises, foram encontrados os coeficientes  $\beta_1 = 51,0$  e  $\beta_2 = 269,0$ , que se afastam dos observados neste trabalho e do proposto por Mao (1987). García (2014), por sua vez, utiliza uma gama variada de materiais, tendo esses um valor médio de 811,1,7 MPa, 14,4% menor do que o aço API 5DP Tool Joint, apresentando um erro de 103,1% na determinação do valor do aço API 5DP Tool Joint. Apesar do experimento de García (2014) e Mao (1987) apresentarem uma diversidade de materiais que se assemelham, a tensão máxima média do trabalho de Mao (1987) foi de 633,1 MPa, 33,2% menor do que o aço API 5DP Tool Joint. Utilizando o método  $F_m/(h_0 \cdot u_m)$ , com os coeficientes  $\beta_1 = 130,0$  e  $\beta_2 = -320,0$ , Mao (1987), o erro encontrado para a determinação da tensão máxima do aço API 5DP Tool Joint foi de -76,6%, conforme a tabela 16.

Nota-se que a classe de resistência e número de amostras de diferentes materiais utilizados durante o ensaio influenciam diretamente nos valores dos coeficientes de ajuste, o que provocou grandes erros para a determinação da tensão máxima do aço API 5DP Tool Joint.

### 5.5.3 Determinação da tenacidade à fratura

Os dados das variáveis relacionadas à tenacidade do material obtidas pelo ensaio SPT são apresentados na Tabela 19, cujos  $F_f$  e  $u_f$  são obtidos a partir dos valores gráficos,  $E^{SP}$  corresponde a área sob a curva SPT,  $h_0$  e  $h_f$  são as espessuras iniciais e finais após fratura, respectivamente. Observa-se, pelos dados, que a condição de ensaio livre apresenta em média valores 10% a mais para os parâmetros de carga, deformação e energia de fratura.

**Tabela 19** – Resultados do ensaio SPT para carga  $F_f$  e energia de fratura  $E^{SP}$ .

Corpo de Prova	$F_f$ [kN]	$u_f$ [mm]	$E^{SP}$ [J]	$h_0$ [mm]	$h_f$ [mm]
SPT_P1_ENG	1,664	1,012	1,425	0,536	0,382
SPT_P2_ENG	1,491	0,958	1,227	0,531	0,391
SPT_P3_ENG	1,644	0,976	1,412	0,540	0,347
SPT_P4_ENG	1,562	0,955	1,269	0,533	0,365
Média	1,590	0,975	1,333	0,535	0,371
Desvio Padrão	0,080	0,026	0,100	0,004	0,019
SPT_P5_LIV	1,865	1,083	1,533	0,539	0,355
SPT_P6_LIV	1,559	1,001	1,252	0,531	0,391

**Tabela 19** – Resultados do ensaio SPT para carga  $F_f$  e energia de fratura  $E^{SP}$ .

Corpo de Prova	$F_f$ [kN]	$u_f$ [mm]	$E^{SP}$ [J]	$h_0$ [mm]	$h_f$ [mm]
SPT_P7_LIV	1,829	1,114	1,497	0,529	0,360
SPT_P8_LIV	1,832	1,103	1,543	0,532	0,364
Média	1,771	1,075	1,456	0,533	0,368
Desvio Padrão	0,143	0,051	0,138	0,004	0,016

Fonte: O autor.

A partir dos dados da Tabela 19, utilizando-se das equações 37, 38, 39 e 42, foram avaliados os resultados da determinação do valor de tenacidade à fratura para o aço API 5DP Tool Joint, com base nos coeficientes encontrado por Mao (MAO; SAITO; TAKAHASHI, 1991; MAO; TAKAHASHI, 1987). Os valores encontrados foram registrados na Tabela 20.

**Tabela 20** – Determinação da tenacidade à fratura  $J_{IC}$  utilizando os coeficientes propostos por Mao.

Condição do corpo de prova	Parâmetro de fratura SPT	$\varepsilon_f$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	k	$J_0$	$J_{IC\_Convencional}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$J_{IC\_SPT}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Erro
<b>Engastado</b>	$\ln ( h_0 / h_f )$	0,368	345,0	113,0	135,2	13,9	-89,7%
	$\beta ( u_f / h_0 )^2$	0,299	345,0	113,0	135,2	-9,8	-107,2%
	$\beta ( u_f / h_0 )^{3/2}$	0,369	280,0	-50,0	135,2	53,3	-60,6%
<b>Livre</b>	$\ln ( h_0 / h_f )$	0,372	345,0	113,0	135,2	15,5	-88,6%
	$\beta ( u_f / h_0 )^2$	0,367	345,0	113,0	135,2	13,6	-90,0%
	$\beta ( u_f / h_0 )^{3/2}$	0,430	42,0	-50,0	135,2	68,1	-49,6%

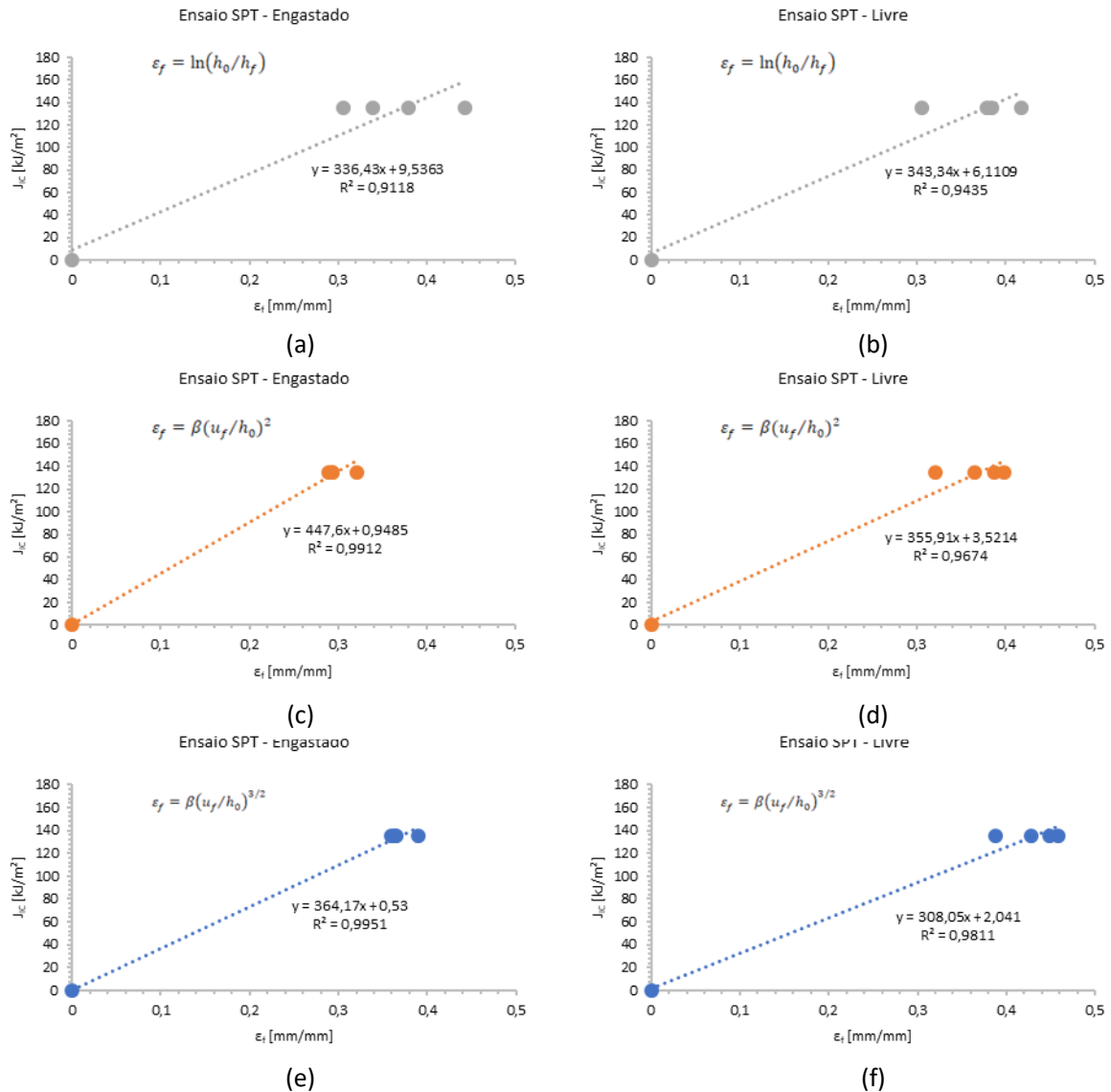
Fonte: O autor.

Observa-se que, dentre os valores encontrados, o resultado com menor erro foi para o método  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^{3/2}$ , no qual,  $\beta=0,15$ , para determinar a tenacidade à fratura do material, com um desvio em relação ao valor do ensaio convencional para a condição engastada de -60,6%, e para a condição livre, de -49,6%. A condição de deformação efetiva de fratura maior que 0,20 mm/mm é atendida para as três condições, possuindo o material comportamento elastoplástico.

Por conseguinte, avaliou-se qual dos três métodos de determinação da tenacidade à fratura apresenta a melhor aderência aos dados encontrados neste trabalho. Para isso, foram plotados o valor médio da tenacidade à fratura do material determinado pelo ensaio de tenacidade convencional contra os parâmetros de deformação efetiva de fratura ( $\varepsilon_f$ ). A Figura 59 apresenta os resultados encontrados. Para ambas as condições de ensaio (engastada e livre),

o parâmetro  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^{3/2}$  apresenta o melhor coeficiente de correlação ( $R^2$ ), ratificando a condição que Mao encontrou como o método que melhor obteve resposta.

**Figura 59** – Avaliado da relação entre a deformação efetiva de fratura  $\varepsilon_f$  e a tenacidade à fratura  $J_{IC}$  do material.



Fonte: O autor. (a) Relação entre  $J_{IC}$  e  $\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f)$  para condição engastada. (b) Relação entre  $J_{IC}$  e  $\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f)$  para condição livre. (c) Relação entre  $J_{IC}$  e  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^2$  para condição engastada. (d) Relação entre  $J_{IC}$  e  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^2$  para condição livre. (e) Relação entre  $J_{IC}$  e  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^{3/2}$  para condição engastada. (f) Relação entre  $J_{IC}$  e  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^{3/2}$  para condição livre.

Foram avaliados os resultados da aplicação dos coeficientes encontrados pelo ajuste das retas, utilizando-se das equações 37, 38, 39 e 42, ilustrados na Figura 59, para determinar o valor da tenacidade à fratura do material. Os resultados são apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21** – Determinação da tenacidade à fratura utilizando os coeficientes ajustados pelo autor.

Condição do corpo de prova	Parâmetro de fratura SPT	$\varepsilon_f$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	k	J <sub>0</sub>	J <sub>IC_Convencional</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	J <sub>IC_SPT</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	Erro
<b>Engastado</b>	$\ln ( h_0 / h_f )$	0,368	336,4	9,5	135,2	114,2	-15,5%
	$\beta ( u_f / h_0 )^2$	0,299	447,6	0,9	135,2	133,0	-1,6%
	$\beta ( u_f / h_0 )^{3/2}$	0,369	364,2	0,5	135,2	134,0	-0,9%
<b>Livre</b>	$\ln ( h_0 / h_f )$	0,372	343,3	6,1	135,2	121,7	-10,0%
	$\beta ( u_f / h_0 )^2$	0,367	355,9	3,5	135,2	127,0	-6,0%
	$\beta ( u_f / h_0 )^{3/2}$	0,430	308,1	2,0	135,2	130,5	-3,5%

Fonte: O autor.

Ratificando a condição já avaliada, os melhores resultados encontrados, simultaneamente para a condição engastada e livre, foram para o método  $\varepsilon_f = \beta(u_f/h_0)^{3/2}$ . O valor determinado para a tenacidade à fratura através do ensaio SPT apresentou um erro de -0,9% para a condição engastada e de -3,5% para a condição livre.

A relação  $u_f/h_0$  tem seu ponto crítico na determinação da deformação de fratura ( $u_f$ ), enquanto que, na relação  $h_0/h_f$ , a variável crítica é a determinação da espessura remanescente de fratura ( $h_f$ ). Trabalhos recentes (JANČA; SIEGL; HAUŠILD, 2016; MORENO, 2018) argumentam que o método da determinação da carga de fratura – e, por conseguinte, a deformação efetiva de fratura que são dependentes da carga máxima do ensaio SPT – é inadequado, especialmente para a caracterização de materiais com alta ductilidade, pois o início da fratura ocorre em carga menor que a máxima. Na tentativa de superar a dificuldade de determinar a deformação de fratura, Foulds (FOULDS et al., 1995) utilizou uma vídeo câmera para identificar o momento em que a fratura iniciava no corpo de prova. Outra possibilidade foi divulgada por Ju (JU; JANG; KWON, 2003) ao utilizar a técnica de emissão acústica para determinar o início da fratura no corpo de prova, concluindo que os resultados obtidos poderiam ser utilizados para o cálculo de integridade em instalações em serviço.

Para a utilização da relação  $h_0/h_f$ , o guia CWA 15627:2007 recomenda o corte do corpo de prova para a determinação da medida  $h_f$ , porém, alternativamente neste trabalho foi utilizada a tomografia computadorizada para a obtenção de um modelo tridimensional da amostra e posterior medição da espessura por imagem digitalizada. Essa ação busca minimizar o erro associado ao processo de corte do corpo de prova, uma vez que é possível não atingir a região de menor espessura, face aos trabalhos manuais requeridos.

Destaca-se assim que os corpos de prova para o ensaio SPT, nas duas condições ensaiadas, apresentaram mecanismo de fratura frágil conforme a avaliação em MEV, que consta no APÊNDICE F – MICROESTRUTURA DA REGIÃO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA SPT. Essa condição é essencial para a aplicação dos conceitos da mecânica da fratura.

Um lote de corpos de prova foi testado para a determinação do valor de  $\beta$  para o aço API 5DP Tool Joint, contudo, os resultados obtidos não foram conclusivos, devido à quantidade reduzida de intervalos testados.

## 6 CONCLUSÃO

A metodologia do ensaio SPT, bem como os dispositivos utilizados e o tratamento dos dados para a obtenção das propriedades de resistência mecânica e de tenacidade à fratura para metais passaram por várias alterações ao longo do tempo, objetivando aumentar a acurácia dos resultados e validar um modelo que fosse empregado para qualquer material. Contudo, ainda há limitações para uma formulação generalizada, a partir da qual fosse possível prever o comportamento de qualquer material.

Para a determinação da tensão de escoamento, o principal fator de influência é a determinação da carga relacionada ao escoamento do material. Por outro lado, a determinação da carga máxima sem fraturas torna-se um desafio. Já para a determinação da tenacidade à fratura, pode-se destacar a restrição do corpo de prova e a identificação da deformação ou tensão crítica para propagação da trinca como determinantes para a obtenção de resultados sólidos.

Com base nos dados coletados e nas análises efetuadas neste trabalho, é possível concluir que a utilização do ensaio SPT, como procedimento para obtenção dos valores de propriedades mecânicas, é viável, concluindo-se que:

- a) A tensão de escoamento através do ensaio SPT, utilizando-se do parâmetro de escoamento SPT  $F_{e\_h0}/10/h_0^2$ , com os coeficientes  $\alpha_1 = 353,3$  e  $\alpha_2 = 4,5$ , apresentou um erro de  $-0,1\%$ , quando comparado ao resultado do ensaio de tração convencional, para a condição do corpo de prova engastado;
- b) A tensão máxima através do ensaio SPT, quando utilizado o parâmetro de resistência SPT  $F_m/(h_0 \cdot u_m)$ , com os coeficientes  $\beta_1 = 226,8$  e  $\beta_2 = 1,5$ , apresentou um erro de  $-0,1\%$ , quando comparado ao resultado do ensaio de tração convencional, para a condição do corpo de prova engastado;
- c) A tenacidade à fratura através do ensaio SPT, ao utilizar-se um corpo de prova sem entalhe, apresenta erro elevado, quando comparado ao resultado do ensaio de tenacidade convencional, para a condição do corpo de prova engastado e livre;
- d) A tenacidade à fratura, através do ensaio de impacto Charpy, apresentou um erro de  $21,3\%$ , ao ser comparado ao resultado do ensaio de tenacidade convencional.
- e) Não deve ser utilizada a configuração esfera mais haste, como penetrador, para a execução do ensaio SPT na condição livre;
- f) Limitar a excentricidade da indentação do corpo de prova a  $0,13$  mm;

- g) Utilizar-se do ensaio SPT para determinar a tensão de escoamento e a tensão máxima de uma dada amostra possui maior aproximação do valor verdadeiro, quando seus coeficientes são obtidos de materiais que possuem características metalúrgicas e mecânicas semelhantes ao material testado;

Com base em tudo que foi exposto e detalhado no decorrer do atual trabalho, algumas sugestões para trabalhos futuros, seguem listadas abaixo, a fim de ampliar o conhecimento sobre o ensaio SPT e de contribuir para torná-lo um método padronizado internacionalmente:

- a) Avaliar, por meio de uma instrumentação mais sensível, a região inicial do ensaio relacionada à deformação elástica do material.
- b) Ampliar o estudo para outras famílias de materiais, avaliando a interação da aderência dos resultados por agrupamentos distintos, considerando a microestrutura do material, os tratamentos termomecânicos, os processos de fabricação, a classe de resistência e de tenacidade e os demais fatores de influência no comportamento do material;
- c) Executar ensaio de SPT com corpo de prova entalhado e avaliar a influência nos coeficientes a serem determinados experimentalmente para o aço API 5DP Tool Joint;
- d) Avaliar o comportamento do corpo de prova durante o ensaio SPT, no intuito de identificar as variáveis de influência para o ensaio através de modelo computacional;
- e) Coletar os dados já publicados para materiais testados, através do ensaio SPT, e consequentemente utilizar uma rede neural para a avaliação da função de determinação dos parâmetros de resistência mecânica e de tenacidade à fratura.
- f) Utilizar técnica EBDS, que trata-se da técnica de difração de elétrons retroespalhados, para a avaliação e a caracterização mecânica de materiais, comparando seus resultados com o ensaio miniaturizado por penetração e os ensaios convencionais;



## REFERÊNCIAS

- ABENDROTH, M.; KUNA, M. Determination of ductile material properties by means of the small punch test and neural networks. *Advanced Engineering Materials*, v. 6, n. 7, p. 536–540, 2004.
- ANDERSON, T. L. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 3ª. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- API. *API RP 7G: Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits*, 1998.
- API. *API 579-1/ASME FFS-1: Fitness for Service*, 2016.
- API. *API SPEC 5DP: Specification for Drill Pipe*, 2018.
- ASTM. *Small Specimen Test Techniques*. 4th. ed. West Conshohocken: ASTM, 2002.
- ASTM. *E1823: Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*, 2013.
- ASTM. E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. *ASTM International*, v. ASTM Stds., n. Designation: E8/E8M-16a, p. 1–28, 2016a.
- ASTM. *E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*, 2016b.
- ASTM. *E111-17: Standard Test Method for Young 's Modulus , Tangent Modulus , and Chord Modulus*. p. 3-9, 2017.
- BARSOM, J. M.; ROLFE, S. T. *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*. 3nd. ed. West Conshohocken: ASTM, 1999.
- BAYOUMI, M. R.; BASSIM, M. N. Study of the relationship between fracture toughness (JIC) and bulge ductility. *International Journal of Fracture*, v. 23, n. 1, p. 71–79, 1983.
- BS. *BS 7910: Guide of Methods for Assessing Acceptability of Flaws in Metallic Structures*, 2013.
- CEGN. *Assesment of the Integrity of Structures containing Defects*, 1986.
- CEN. *CWA 15627: Small Punch Test Method for Metallic*, 2007.
- CHAKRABARTY, J. A theory of stretch forming over hemispherical punch heads. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 12, n. 4, p. 315–325, 1970.
- CONTRERAS, M. A. et al. Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, v. 31, n. 9, p. 727-737, 2008.
- COSSIO, M. L. T. et al. *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Sharpe ed.

Baltimore: Springer, 2012.

DUCKETT, W. Risk analysis and the acceptable probability of failure. *Structural Engineer*, v. 83, n. 15, p. 25-26, 2005.

ERICKSONKIRK, M. A. et al. A Comparison of the tanh and Exponential Fitting Methods for Charpy V-Notch Energy Data. *Journal of Pressure Vessel Technology*, v. 131, n. 3, p. 31404–31413, 2009.

FOULDS, J. R. et al. Fracture Toughness by Small Punch Testing. *Journal of Testing and Evaluation*, v. 23, n. 1, p. 3–10, 1995.

FOULDS, J. R.; VISWANATHAN, R. Nondisruptive material sampling and mechanical testing. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 15, n. 3–4, p. 151–162, 1996.

GALAMBOS, T. V. Developments in Modern Steel Design Standards. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 17, p. 141–162, 1990.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. DOS. *Ensaio dos Materiais*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GARCÍA, T. E. et al. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 582, p. 708–717, 2014.

HA, J. S.; FLEURY, E. Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: II. Fracture toughness. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 75, n. 9, p. 707–713, 1998.

HAAG, J. *Influência Da Geometria Do Corpo De Prova E Do Tamanho De Trinca Na Tenacidade À Fratura Do Aço Api 5Dp Tool Joint*. [s.l.] UFRGS, 2015.

HAAN, J. DE. *Human Error in Structural Engineering: The design of a Human Reliability Assessment method for Structural Engineering*. Delft: [s.n.].

HASHMI, M. S. J. *Comprehensive Materials Processing*. 1st. ed. [s.l.] Elsevier, 2014. v. 53

HERTZBERG, R. W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. 4nd. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, INC., 1996.

HÜTTER, G.; ZYBELL, L. *Recent Trends in Fracture and Damage Mechanics*. 1. ed. [s.l.] Springer, 2016.

IRWIN, G. R. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. *Journal of Applied Mechanics*, v. 24, p. 361–364, 1957.

JANČA, A.; SIEGL, J.; HAUŠILD, P. Small punch test evaluation methods for material characterisation. *Journal of Nuclear Materials*, v. 481, 2016.

JOHN, E. G. Simplified curve fitting using spreadsheet add-ins. *International Journal of Engineering Education*, v. 14, n. 5, p. 375–380, 1998.

JU, J.-B.; JANG, J.; KWON, D. Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 80, n. 4, p. 221–228, abr. 2003.

KAMEDA, J. Development of Small Punch Test Technique and Its Application of Evaluation of Mechanical Properties Degradation. *Journal of Mineral and Metal Society*, 1994.

KARTHIK, V.; KASIVISWANATHAN, K. V.; RAJ, B. *Miniaturized Testing of Engineering Materials*. 1ª. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

KUNA, M.; ABENDROTH, M. Identification and validation of ductile damage parameters by the small punch test. *15th European Conference of Fracture (ECF-15) – ‘Advanced Fracture Mechanics for Life and Safety Assessments’*, v. 1, p. 710–725, 2004.

LACALLE, R. et al. Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos. *Anales de Mecánica de la Fractura*, v. 2, n. 26, p. 501–506, 2009.

LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J. A.; GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Analysis of key factors for the interpretation of small punch test results. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, v. 31, n. 10, p. 841–849, 2008.

LI, H.; CHEN, F. C.; ARDELL, A. J. A simple, versatile miniaturized disk-bend test apparatus for quantitative yield-stress measurements. *Metallurgical Transactions A*, v. 22, n. 9, 1991.

LINSE, T. et al. Usage of the small-punch-test for the characterisation of reactor vessel steels in the brittle-ductile transition region. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 75, n. 11, p. 3520–3533, 2008.

LONG, E. J. *Palisades Nuclear Power Plant Extended Beltline Reactor Vessel Integrity Evaluation*. Cranberry Township: [s.n.].

LUCAS, G. E. Review of small specimen test techniques for irradiation testing. *Metallurgical Transactions A*, v. 21, n. 4, p. 1105–1119, 1990.

LUCON, E. Testing of Small-Sized Specimens. In: HASHMI, M. S. J. (ed.). *Comprehensive Materials Processing*. 1st. ed. Boulder: Elsevier, 2014. p. 135–160.

MACHADO, R. DE O. *Análise de criticidade de descontinuidade em um bocal de um vaso de pressão*. [s.l.] UFRGS, 2011.

MANAHAN, M. P.; ARGON, A. S.; HARLING, O. K. The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties. *Journal of Nuclear Materials*, v. 103 & 104, n. C, p. 1545–1550, 1981.

MAO, X.; SAITO, M.; TAKAHASHI, H. Small punch test to predict ductile fracture-toughness JIC and brittle-fracture toughness KIC. *Scripta Metallurgica et Materialia*, v. 25, n. 11, p. 2481–2485, 1991.

MAO, X.; TAKAHASHI, H. Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk ( $\phi$  3 mm) small punch tests. *Journal of Nuclear Materials*, v. 150, n. 1,

p. 42–52, set. 1987.

MCEVILY, A. J. *Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention*. [s.l.] John Wiley & Sons, INC., 2001.

MEDINA, J. A. H. *Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica*. [s.l.] PUC-RJ, 2014.

MELCHERS, R. E. Human error in structural design tasks. *Journal of Structural Engineering*, v. 115, n. 7, p. 1795–1807, 1989.

MORENO, M. F. Effects of thickness specimen on the evaluation of relationship between tensile properties and small punch testing parameters in metallic materials. *Materials and Design*, v. 157, 2018.

OLDFIELD, W. et al. Report No. *EPRI-NP-2428: Irradiated Nuclear Pressure Vessel Steel Database* Goleta, 1982.

OROWAN, E. The fatigue of glass under stress. *Nature*, v. 154, n. 3906, p. 341–43, 1944.

RASCHE, S.; KUNA, M. Improved small punch testing and parameter identification of ductile to brittle materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 125, p. 23–34, 2015.

RAZVAN, R. Some remarks on the history of fracture mechanics. Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling, Circuits, Systems and Signals. *Anais...2009*

RICE, J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, v. 35, p. 379–386, 1968.

RODRÍGUEZ, C. et al. Mechanical properties characterization of heat-affected zone using the small punch test. *Welding Research Supplement*, v. 88, n. September, p. 188s-192s, 2009.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E.; MALHAS, F. A. *Steel Structures Design and Behavior*. 5th. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2009.

SAQ. *A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks*, 2008.

SAXENA, A. *Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers*. Londres: CRC Press, 1998.

SHAIKH, M. T. E. AND A.; ERICKSONKIRK, M. Insights and observations arising from curve-fitting the charpy v-notch and tensile data contained within the united states' light water reactor surveillance database. Proceedings of PVP2008 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. *Anais...Chicago: ASME and U.S. Government, 2008*

SHIN, H.; PARK, J.; LEE, H. CURVE FITTING IN THE TRANSITION REGION OF CHARPY IMPACT DATA. *International Journal of Modern Physics B*, v. 22, n. 9, 10 &11, p. 1496–1503, 2008.

SINTAP. *Estructural Integrity Assessment Procedures for European Industry- Task 5, subtask 5.1*, 2007.

MISAWA et al. Small Specimen Fracture Toughness Tests of HT-9 Steel Irradiated with Protons. *Journal of Nuclear Materials*, v. 133&134, p. 313, 1985.

TAKAHASHI, H. et al. *JAERI-M 88-172: Recommended Practice for Small Punch (SP) Testing of Matallic Materials*. Japan Atomic Energy Research Institute, , 1988.

TERÁN, G. et al. Estimation of fracture toughness KIC from Charpy impact test data in T-welded connections repaired by grinding and wet welding. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 153, p. 351–359, 2016.

WELLS, A. A. Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture. Proceedings of the Crack Propagation Symposium. *Anais...Cranfield*: 1961

WESTERGAARD, H. M. Bearing Pressures and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, v. 6, p. A49–A53, 1939.

## APÊNDICE A – MEDIÇÕES DOS CORPOS DE PROVA SPT APÓS LIXAMENTO

**Tabela 22** – Resultado da medição de espessura dos corpos de prova do ensaio SPT após lixamento.

Corpo de prova	1 [ $\mu\text{m}$ ]	2 [ $\mu\text{m}$ ]	3 [ $\mu\text{m}$ ]	4 [ $\mu\text{m}$ ]	5 [ $\mu\text{m}$ ]	Média [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio Padrão [ $\mu\text{m}$ ]
CP01	540	533	530	538	539	536	4,3
CP02	530	531	528	534	530	531	2,2
CP03	538	538	541	542	540	540	1,8
CP04	532	535	532	533	533	533	1,2
CP05	539	540	539	538	537	539	1,1
CP06	525	538	531	530	530	531	4,7
CP07	529	530	533	524	531	529	3,4
CP08	533	532	533	533	527	532	2,6
CP09	544	543	542	537	545	542	3,1
CP10	528	533	533	532	536	532	2,9
CP11	524	531	525	528	525	527	2,9
CP12	532	540	537	540	535	537	3,4
CP13	524	533	525	527	528	527	3,5
CP14	520	524	523	526	526	524	2,5
CP15	544	537	544	536	545	541	4,3
CP16	544	543	543	545	542	543	1,1
CP17	536	534	529	534	534	533	2,6
CP18	534	538	539	535	545	538	4,3
CP19	540	534	541	536	540	538	3,0
CP20	547	544	534	547	546	544	5,5

Fonte: O autor.

**Tabela 23** – Resultado da rugosidade superficial dos corpos de prova do ensaio SPT após lixamento.

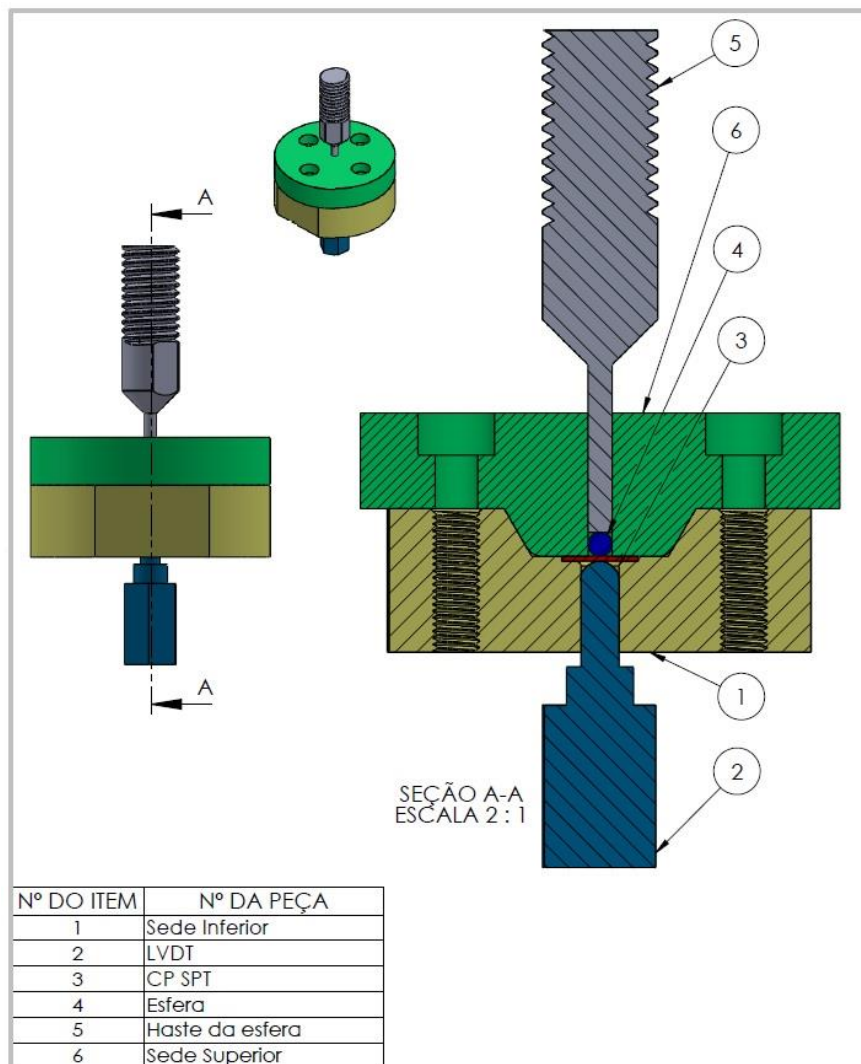
Corpo de prova	Lado A Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Lado B Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Média Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Desvio Padrão [ $\mu\text{m}$ ]
CP01	0,03	0,02	0,03	0,01
CP02	0,04	0,05	0,05	0,01
CP03	0,04	0,04	0,04	0,00
CP04	0,02	0,03	0,03	0,01
CP05	0,03	0,03	0,03	0,00
CP06	0,04	0,04	0,04	0,00
CP07	0,04	0,05	0,05	0,01
CP08	0,03	0,05	0,04	0,01
CP09	0,03	0,05	0,04	0,01
CP10	0,03	0,04	0,04	0,01
CP11	0,04	0,04	0,04	0,00
CP12	0,05	0,05	0,05	0,00
CP13	0,04	0,04	0,04	0,00
CP14	0,04	0,03	0,04	0,01
CP15	0,05	0,04	0,05	0,01
CP16	0,03	0,04	0,04	0,01
CP17	0,04	0,04	0,04	0,00
CP18	0,04	0,02	0,03	0,01
CP19	0,02	0,03	0,03	0,01
CP20	0,02	0,03	0,03	0,01

Fonte: O autor.

## APÊNDICE B – DETALHAMENTO DO DISPOSITIVO DE TESTE SPT

A Figura 60 ilustra o esquema de utilização e o descritivo das partes do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT. O dispositivo foi fabricado a partir de uma barra redonda de 3 polegadas de diâmetro de aço VC131 de fabricação da VILLARES METALS. Esse aço é ideal para aplicação em matrizes, possuindo um alto valor de Cromo (11,5%). A barra passou por processo de usinagem por eletroerosão, torneamento em unidade de comando numérico e retifica com ferramenta de corte diamantada. O requisito de dureza foi obtido por tratamento térmico de têmpera e revenido com dureza final das peças superior a 55 HRC. O controle dimensional das peças foi realizado por instrumentos com precisão de 0,001mm.

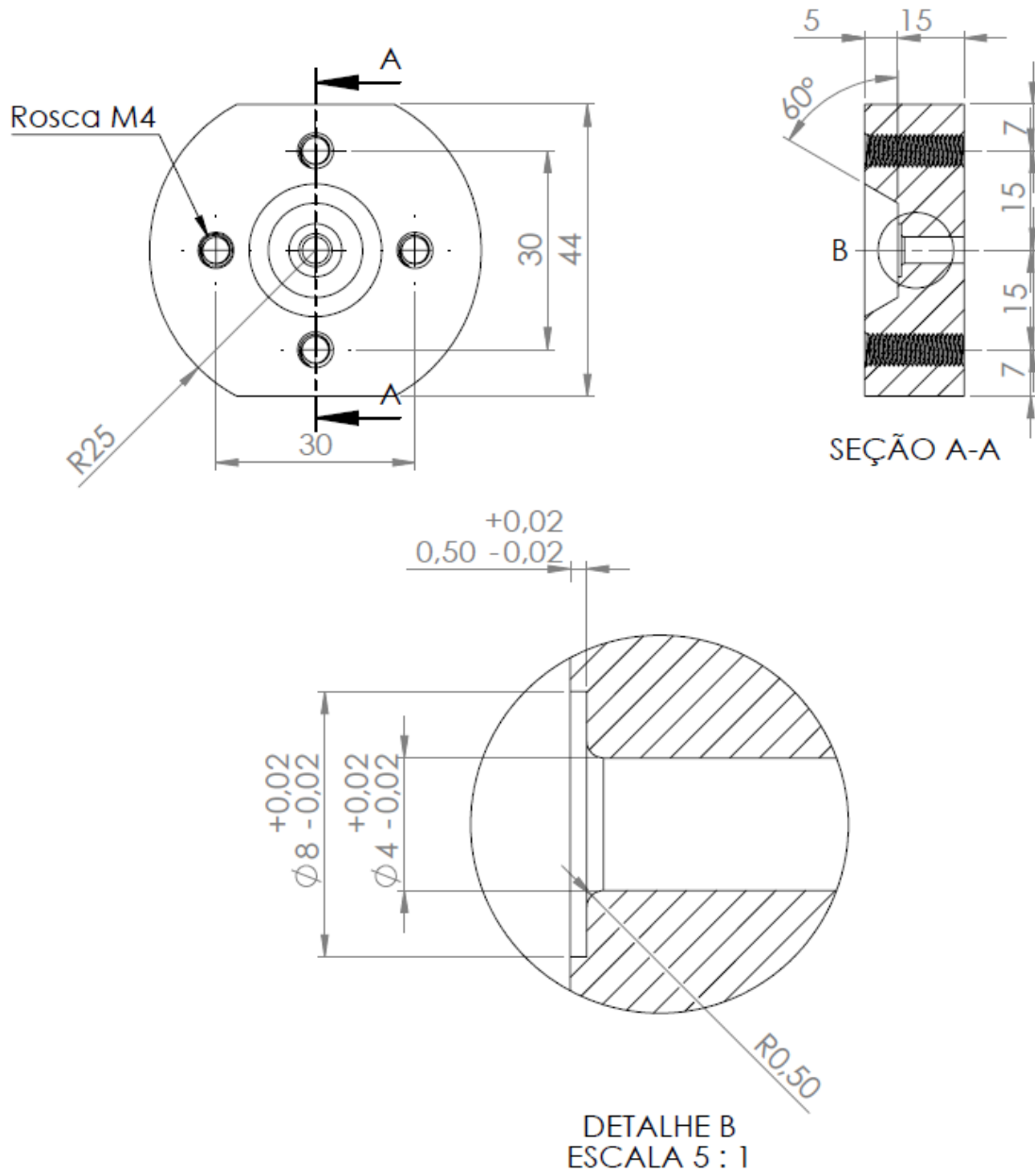
**Figura 60** – Esquema do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627.



Fonte: O autor.

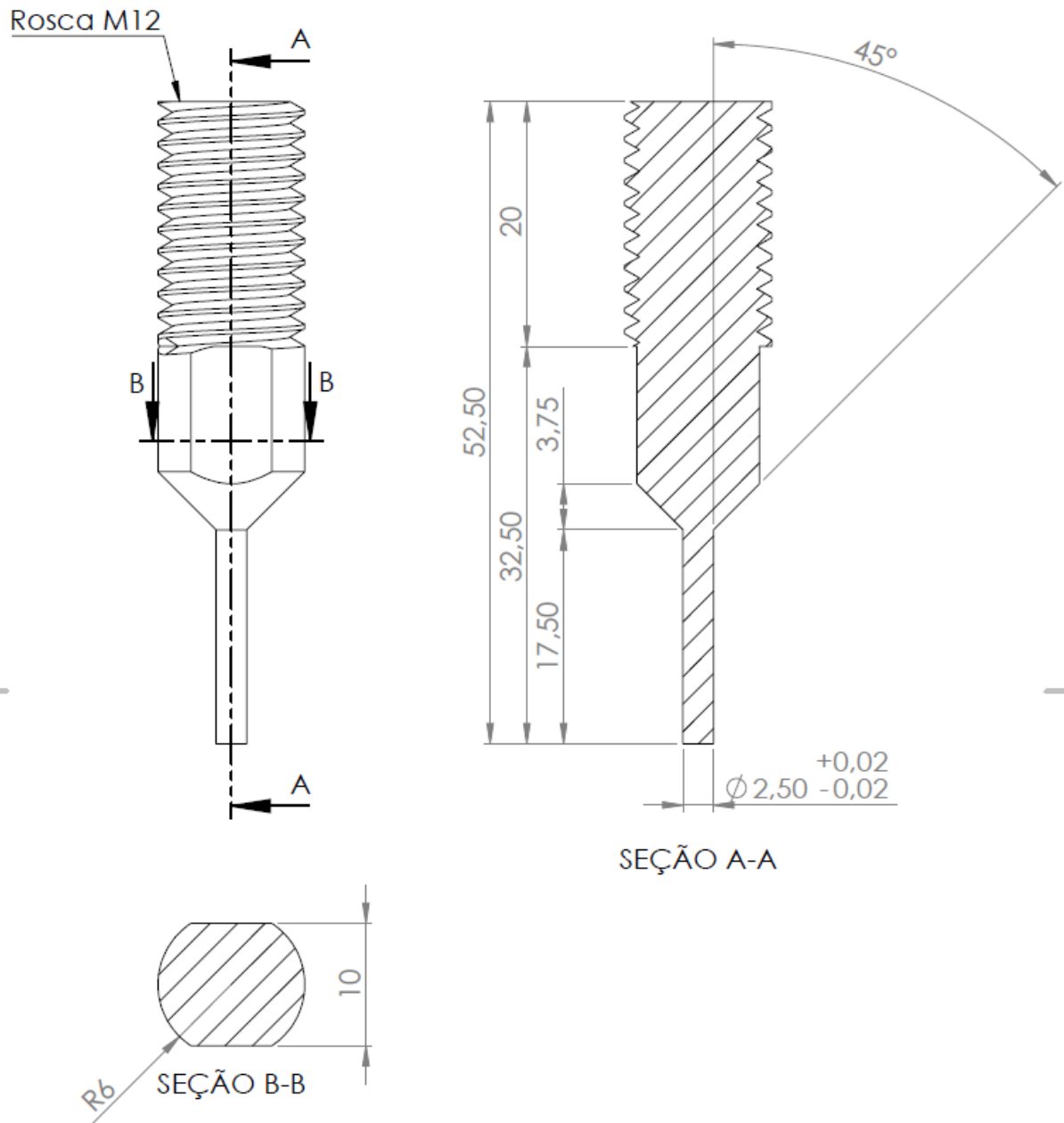


**Figura 61** – Detalhamento da sede inferior do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627.



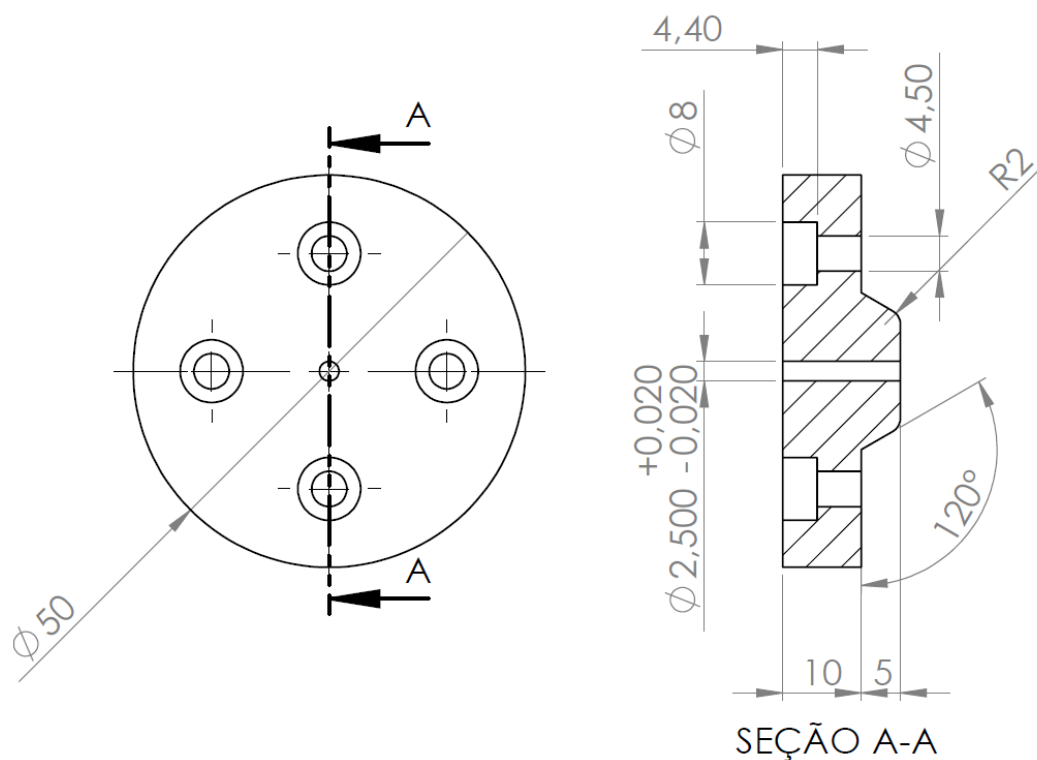
Fonte: O autor.

**Figura 62** – Detalhamento da haste da esfera do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627.



Fonte: O autor.

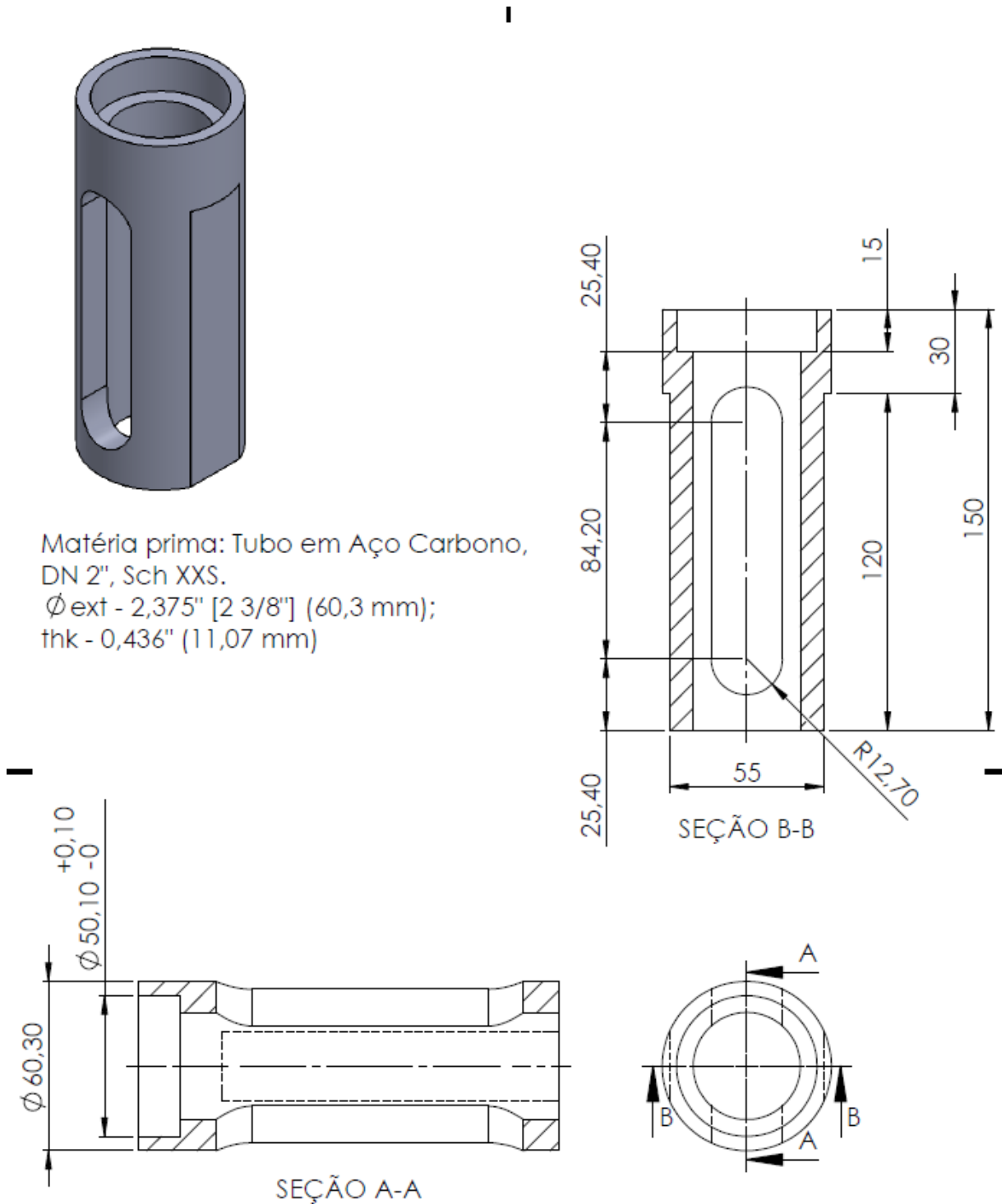
**Figura 63** – Detalhamento da sede superior do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT com base no guia CWA 15627.



Fonte: O autor.

Para adaptar o dispositivo de teste na máquina universal de ensaios, eletromecânica e microprocessada, fabricante SHIMADZU, modelo AG-IC, foi necessário confeccionar uma base de apoio. Foi utilizado um trecho de tubo de aço API 5L Gr B, Sch XXS. Detalhe da base conforme desenho da Figura 64.

**Figura 64** – Detalhamento da base do dispositivo de teste para execução do ensaio SPT.

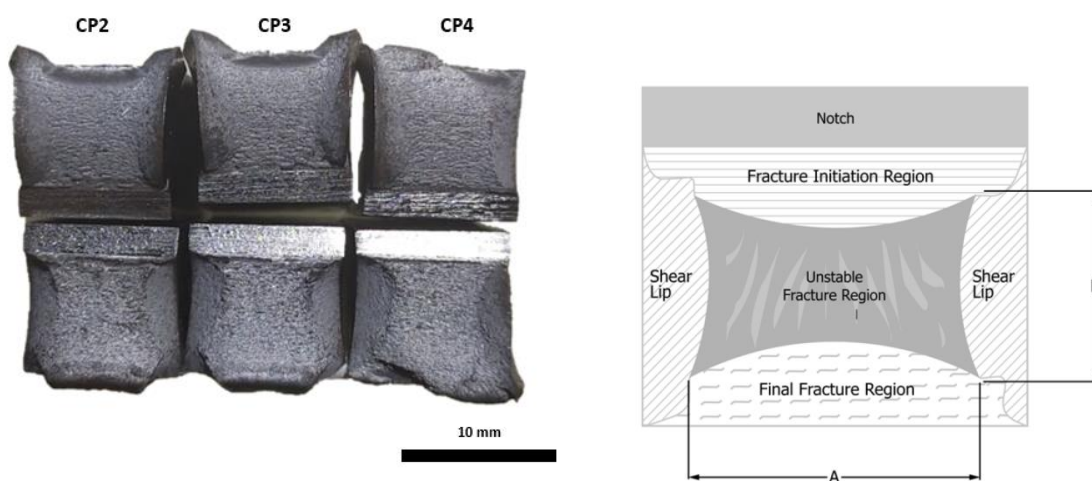


Fonte: O autor.

## APÊNDICE C – AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DAS AMOSTRAS DO ENSAIO DE IMPACTO *CHARPY*

Foi avaliada a face de fratura dos corpos de prova ensaiados a temperatura ambiente (22,0°C), e determinado o percentual de fratura dúctil, com base na metodologia apresentada pelo ASTM E23 (ASTM, 2016b), salientando que este método não apresenta boa acurácia, uma vez que a determinação dos limites de cada região é de difícil distinção. As faces de fratura são apresentadas na Figura 65 e o percentual de fratura na Tabela 24.

**Figura 65** – Faces da fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto testados a 22,0°C.



Fonte: (a) O autor, (b) (ASTM, 2016b). Adaptado pelo autor.

**Tabela 24** – Resultado do ensaio de impacto *Charpy* do aço API 5DP *Tool Joint*.

CP	Temp. (°C)	Energia (J)	Fratura Dúctil (%)
1	102,0	152,0	47,0
2	21,0	127,5	43,0
3	21,0	147,1	43,0
4	21,0	152,0	43,0
5	0,0	134,8	43,0
6	-20,0	110,3	43,0
7	-20,0	139,7	43,0
8	-54,0	61,8	47,0
9	-54,0	83,4	40,0
10	-54,0	83,4	40,0
11	-73,0	39,2	29,0
12	-73,0	58,8	40,0
13	-73,0	68,6	40,0
14	-86,0	38,2	40,0
15	-86,0	38,2	33,0
16	-86,0	39,2	33,0
17	-120,0	28,4	0,0
18	-120,0	28,4	0,0
19	-120,0	29,4	0,0
20	-187,0	15,7	0,0
21	-187,0	15,7	0,0
22	-187,0	17,7	0,0

Fonte: O autor.

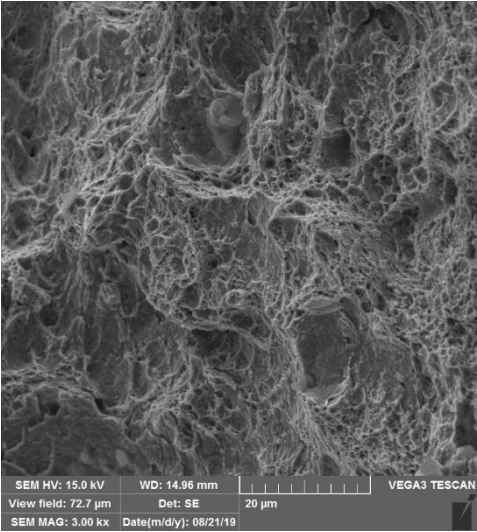
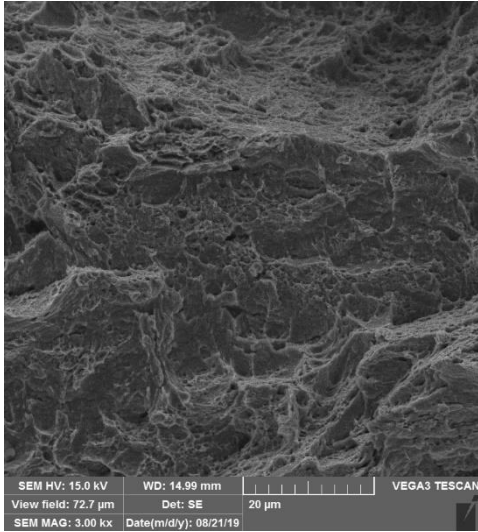
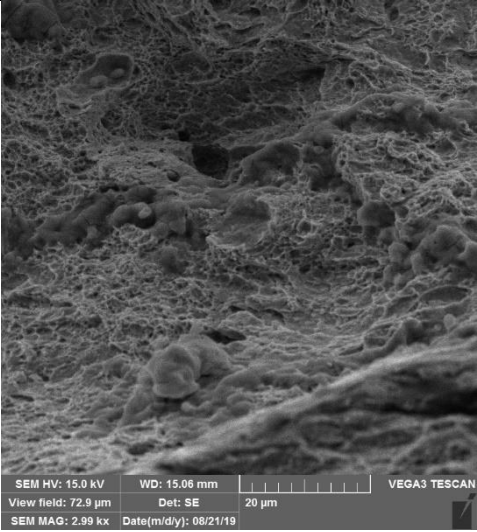
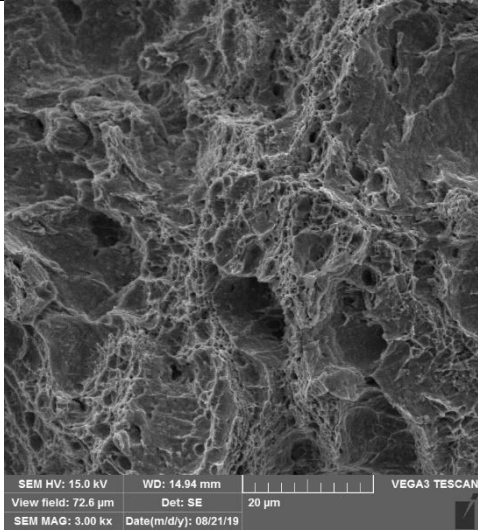
Observa-se uma região de fratura dúctil, estimada em média 44,3%, para os três os corpos de prova. A fratura dúctil no corpo de prova de impacto caracteriza-se pelo crescimento estável da trinca nas regiões de início de fratura, bordas e fim de fratura. A região complementar, que contém em média 55,7%, apresenta modo de fratura frágil, que se caracteriza pelo crescimento instável das trincas na região central do corpo de prova de impacto. A temperatura de 22,0°C a energia média absorvida foi de 142,2J. Esse valor fica na região de transição da curva ajustada, ilustrada na Figura 52, em uma região tipicamente dominada pelo modo de fratura misto entre dúctil e frágil.

Como pode ser visto na Figura 66, a avaliação do mecanismo de fratura corrobora o modo de falha dos corpos de prova e os valores de energia absorvidos. Para o corpo de prova CP2, que obteve um valor de energia absorvida de 127,5J, observa-se pela imagem a), localizada na borda do corpo de prova, que o mecanismo da fratura é alveolar. Esse tem sua formação pelo coalescimento de microcavidades do material. Contudo, na mesma região existe o mecanismo de clivagem, característico de fratura frágil. Já a região central, imagem b), local

da propagação instável da trinca com o modo de fratura frágil, é dominado pelo mecanismo de clivagem, apresentando também uma pequena porção de alvéolos. O CP4, por sua vez, apresenta uma condição inversa. Esse absorveu um valor de energia de 152,0J, maior que o CP2, após o impacto. Observa-se pela imagem c), localizada na borda do corpo de prova, que o mecanismo da fratura é alveolar. Na mesma região existe o mecanismo de clivagem, característico de fratura frágil, porém em menor proporção do que o CP2. Já a região central, imagem d), local da propagação instável da trinca com o modo de fratura frágil, apresenta uma mistura dos dois mecanismos de fratura, com uma prevalência da clivagem, porém com uma porção do mecanismo alveolar superior ao apresentado pelo CP2.

O CP2, CP3 e CP4 estão localizados na região de transição, mas deslocado a direita próximo do patamar superior, região característica de fratura dúctil. Com a redução da temperatura, pode-se observar no gráfico da Figura 52 que o percentual de fratura dúctil reduz até atingir o patamar inferior onde o modo de fratura é frágil. A Figura 67 ilustra essa situação apresentando a superfície de fratura do corpo de prova CP15 e CP21 testados a  $-86,0^{\circ}\text{C}$  e  $-186,0^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Verifica-se que o mecanismo de fratura dominante em ambos os casos é de clivagem.

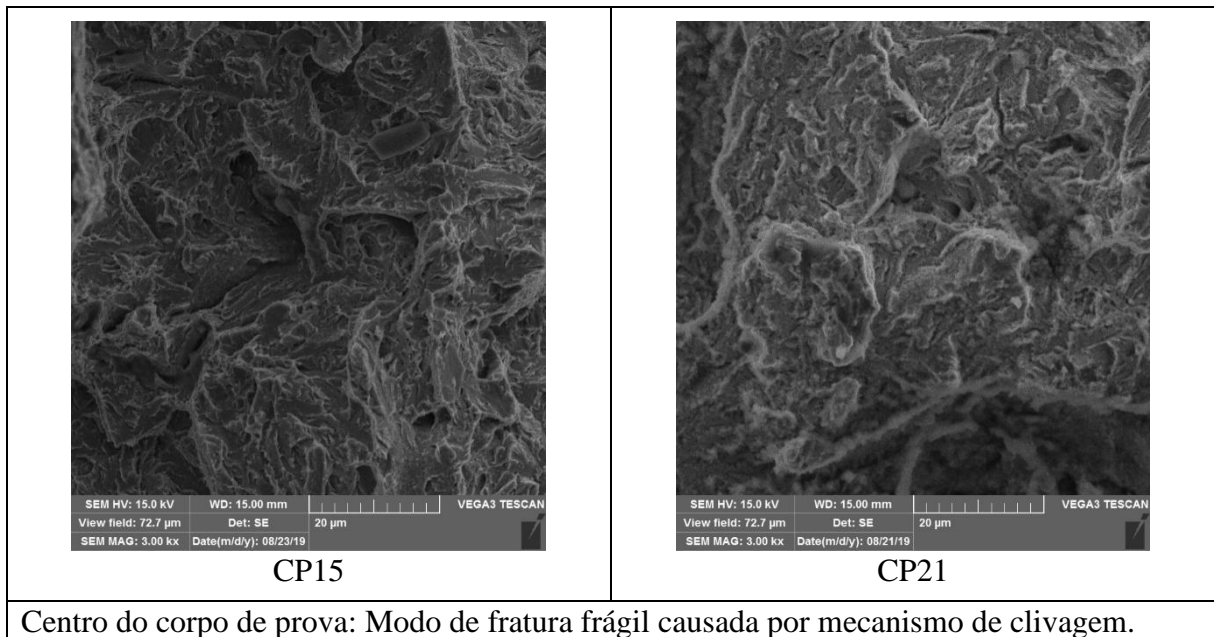
**Figura 66** – Avaliação da superfície de fratura das amostras de impacto testados a 22,0°C.

 <p>SEM HV: 15.0 kV    WD: 14.96 mm    VEGA3 TESCAN View field: 72.7 µm    Det: SE    20 µm SEM MAG: 3.00 kx    Date(m/d/y): 08/21/19</p> <p>(a)</p>	 <p>SEM HV: 15.0 kV    WD: 14.99 mm    VEGA3 TESCAN View field: 72.7 µm    Det: SE    20 µm SEM MAG: 3.00 kx    Date(m/d/y): 08/21/19</p> <p>(b)</p>
<p>CP2 – Borda: Modo de fratura dúctil. Mecanismo de fratura predominante alveolar, com presença de mecanismo por clivagem em pequenas porções.</p>	<p>CP2 – Centro: Modo de fratura frágil. Mecanismo de fratura predominante clivagem, com presença de mecanismo por alvéolos em pequenas porções.</p>
 <p>SEM HV: 15.0 kV    WD: 15.06 mm    VEGA3 TESCAN View field: 72.9 µm    Det: SE    20 µm SEM MAG: 2.99 kx    Date(m/d/y): 08/21/19</p> <p>(c)</p>	 <p>SEM HV: 15.0 kV    WD: 14.94 mm    VEGA3 TESCAN View field: 72.6 µm    Det: SE    20 µm SEM MAG: 3.00 kx    Date(m/d/y): 08/21/19</p> <p>(d)</p>
<p>CP4 – Borda: Modo de fratura dúctil. Mecanismo de fratura predominante alveolar, com presença de mecanismo por clivagem em pequenas porções. Presença de pequenas porções de sujeira na região central.</p>	<p>CP4 – Centro: Modo de fratura frágil. Mecanismo de fratura predominante clivagem, com presença de mecanismo por alvéolos em porções dispersas.</p>

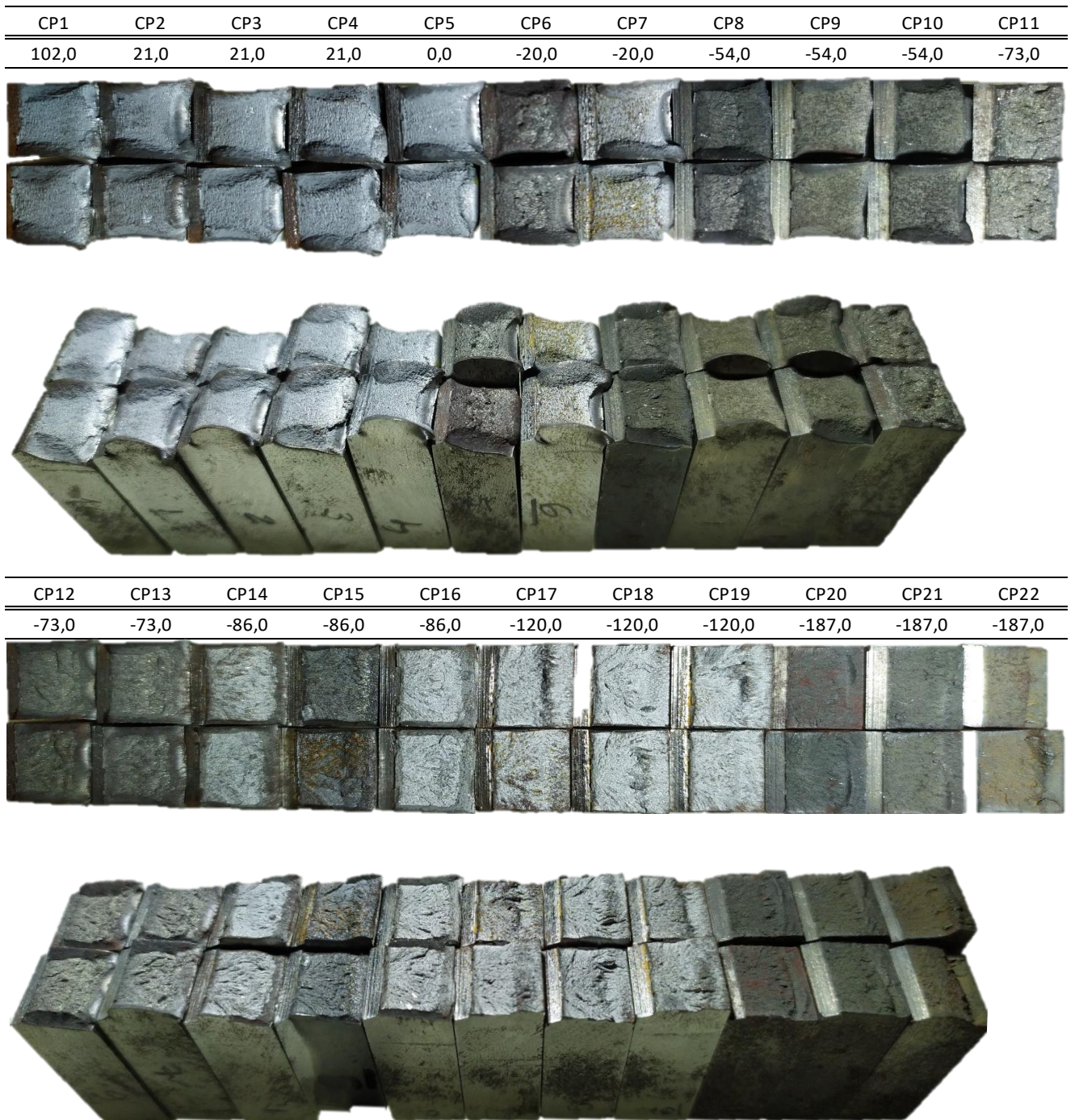
Fonte: O autor.



**Figura 67** – Avaliação da superfície de fratura das amostras de impacto testados a  $-86,0^{\circ}\text{C}$  e  $-186,0^{\circ}\text{C}$ .



Fonte: O autor.

**Figura 68** – Face de fratura dos corpos de prova do ensaio de impacto.

Fonte: O autor.

## APÊNDICE D – MEDIÇÕES DOS CORPOS DE PROVA SPT APÓS ENSAIO

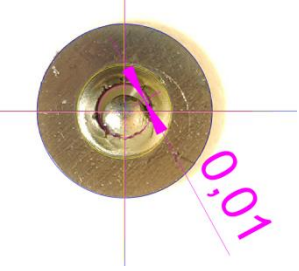
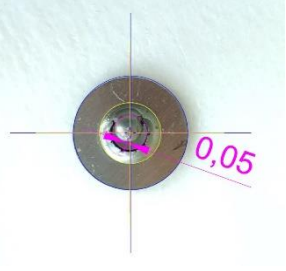
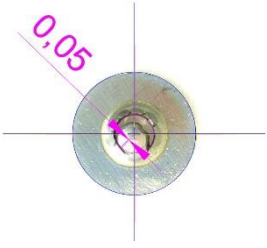

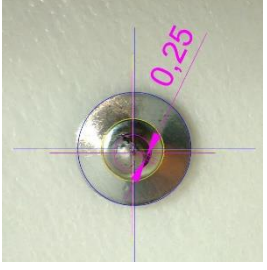
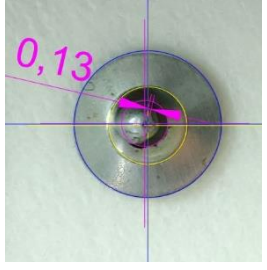
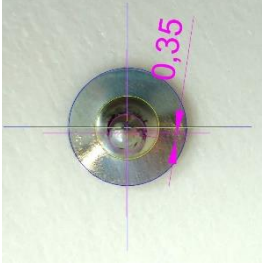

**Tabela 25** – Resultado da medição dos corpos de prova do ensaio SPT após ensaiado.

Corpo de prova	$h_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$h_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	$h_0/h_f$	$\epsilon_f$
CP01	493	382	1,29	0,25
CP02	481	391	1,23	0,21
CP03	515	347	1,48	0,39
CP04	533	365	1,46	0,38
CP05	539	355	1,52	0,42
CP06	531	391	1,36	0,31
CP07	529	360	1,47	0,38
CP08	532	364	1,46	0,38
CP09	542	466	1,16	0,15
CP10	532	472	1,13	0,12
CP11	527	442	1,19	0,18
CP12	537	432	1,24	0,22
CP13	527	397	1,33	0,28
CP14	524	400	1,31	0,27
CP15	541	425	1,27	0,24
CP16	543	500	1,09	0,08
CP17	533	344	1,55	0,44
CP18	538	395	1,36	0,31
CP19	538	395	1,36	0,31
CP20	544	365	1,49	0,40

Fonte: O autor.

## APÊNDICE E – MEDIÇÃO DA EXCENTRICIDADE DA INDENTAÇÃO DO CORPO DE PROVA DO ENSAIO SPT

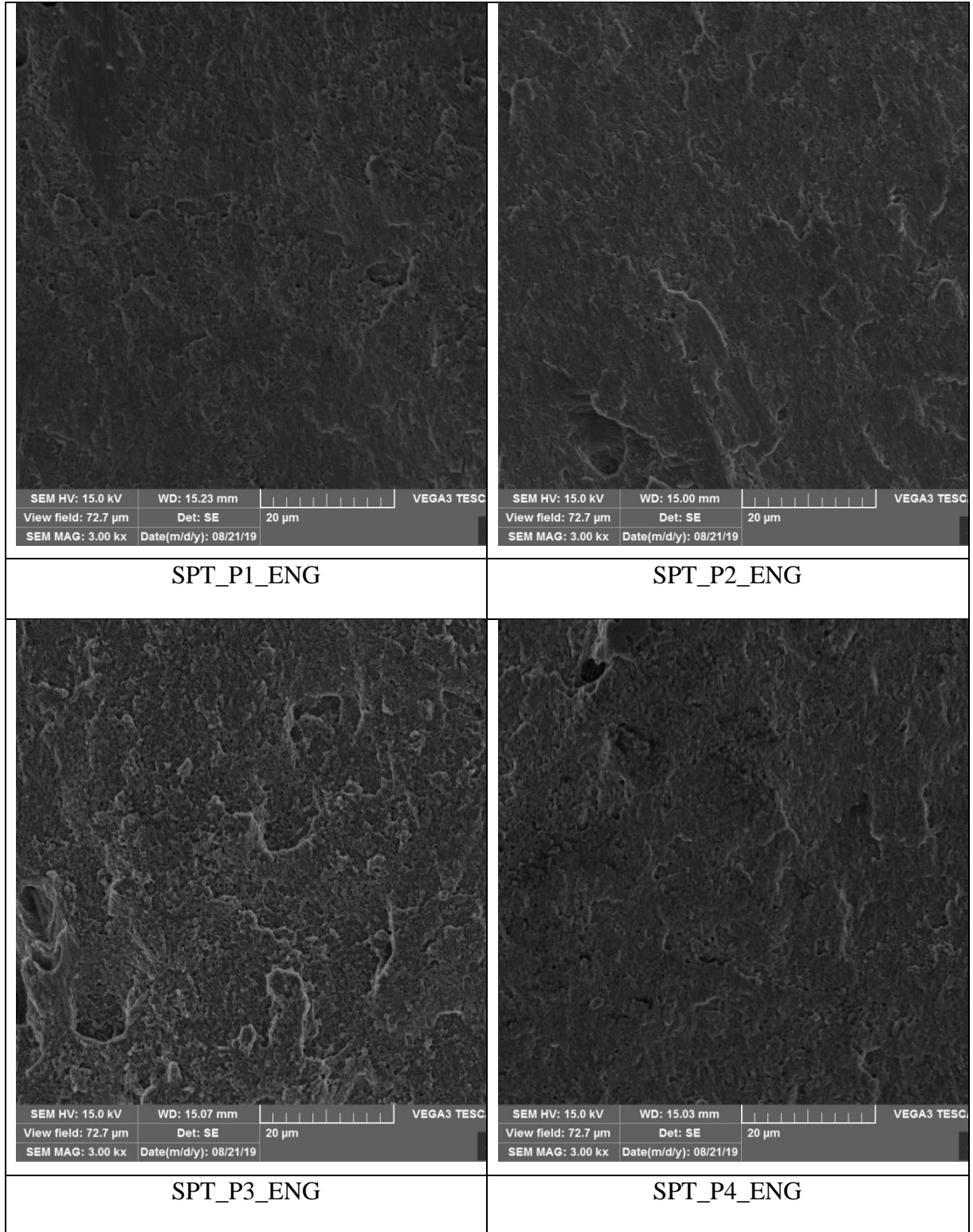
Figura 69 – Medição da excentricidade da indentação dos corpos de prova do ensaio SPT.

	
SPT_P1_ENG	SPT_P2_ENG
	
SPT_P3_ENG	SPT_P4_ENG
	
SPT_P5_LIV	SPT_P6_LIV
	
SPT_P7_LIV	SPT_P8_LIV

Fonte: O autor.

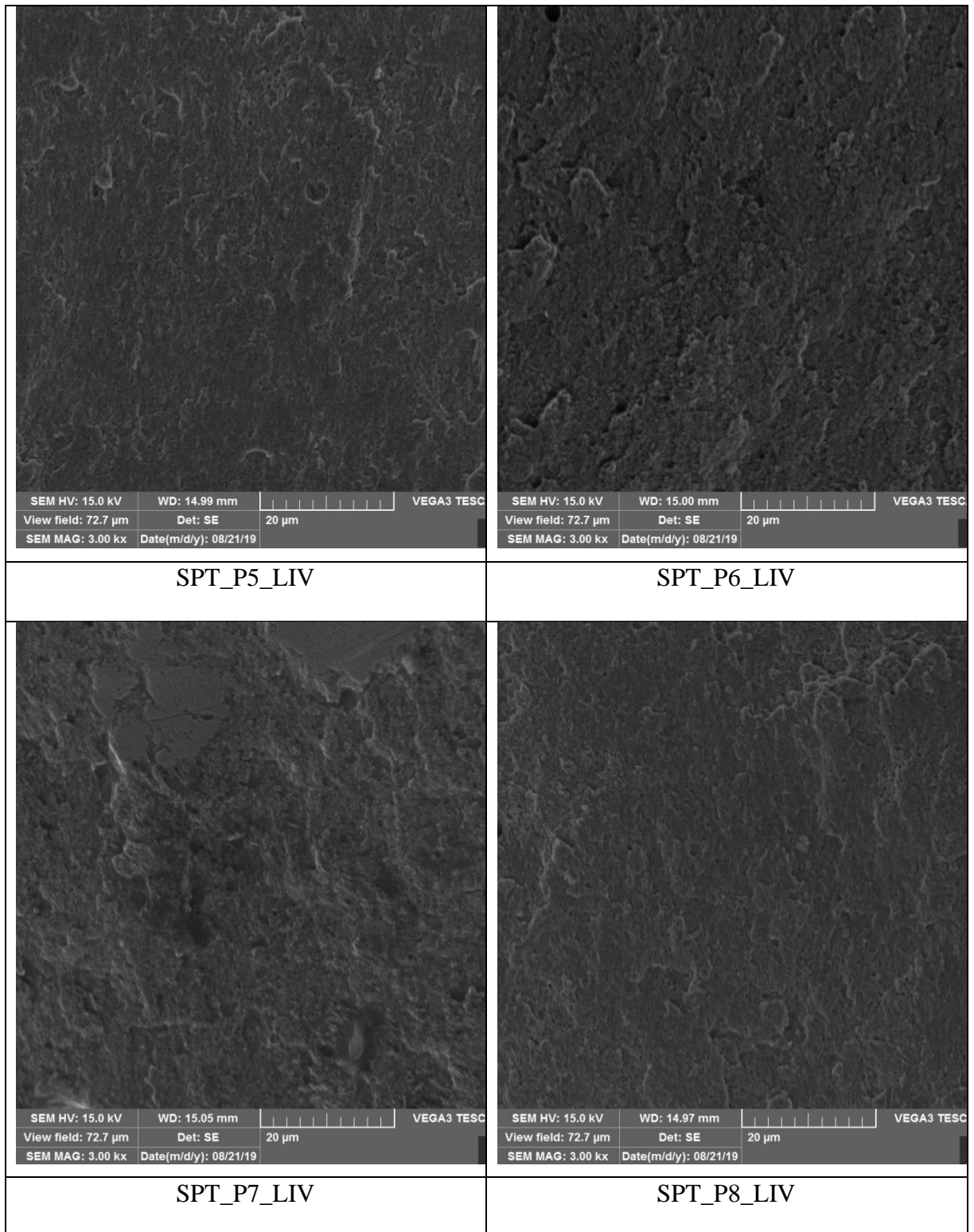
**APÊNDICE F – MICROESTRUTURA DA REGIÃO DE FRATURA DOS CORPOS DE PROVA SPT**

**Figura 70** – Microestrutura da fratura dos corpos de prova SPT Engastados.



Fonte: O autor.

**Figura 71** – Microestrutura da fratura dos corpos de prova SPT Livre.



Fonte: O autor.

## **ANEXO A – METODOLOGIA PARA O ENSAIO SPT CONFORME CWA 15627**

Este anexo descreve de forma objetiva os requisitos constantes no guia CWA 15627 para execução do ensaio SPT para determinação dos parâmetros de resistência mecânica e tenacidade.

### **1. Equipamentos para execução do ensaio**

#### ***1.1. Dispositivo de teste***

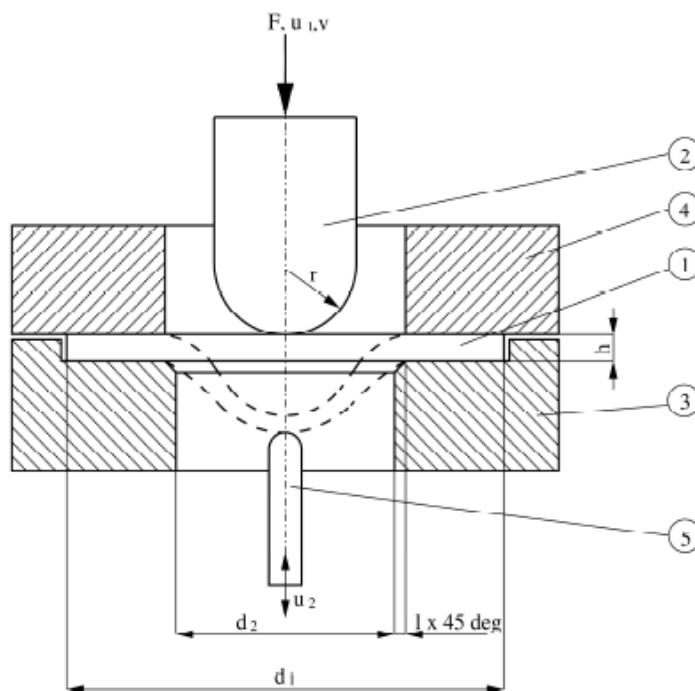
O dispositivo é ilustrado conforme a Figura 72 com o penetrador e o corpo de prova. O diâmetro do furo da sede inferior  $d_2 = 4,0$  mm e o raio do penetrador  $r = 1,25$  mm são recomendados para corpos de prova com  $d_1 = 8,0$  mm de diâmetro. É possível utilizar corpos de prova com diâmetros diferentes, desde que o diâmetro do furo da sede inferior e do raio do penetrador sejam modificados de forma apropriada. O chanfro da sede inferior deve ter comprimento de  $l = 0,2$  mm.

O dispositivo de teste deve ter um penetrador esférico capaz de forçar a parte central do corpo de prova através do furo da sede inferior até a conclusão do ensaio. A ponta esférica deve ter dureza suficiente para que não ocorra deformação durante o teste. Uma dureza de 55 HRC é suficiente para a aplicação na maioria dos aços. É necessário avaliar a ovalização da ponta esférica e registrar seus valores.

As faces de contato entre a sede superior e inferior, e entre a sede inferior e o corpo de prova devem ser perfeitamente planas e paralelas. Todas as superfícies devem ser limpas, livres de impurezas e rígidas o suficiente para que não deformem durante o teste. É recomendada uma dureza maior ou igual a 55 HRC.

O dispositivo de teste pode ser usado em duas configurações: Com o corpo de prova engastado, onde esse está fixo entre a sede superior e inferior de modo a não permitir qualquer deslocamento do perímetro do corpo de prova durante o teste, e com o corpo de prova livre, onde esse está solto entre a sede superior e inferior de modo a permitir qualquer deslocamento do perímetro do corpo de prova durante o teste.

**Figura 72** – Dispositivo de teste para ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007) Adaptado pelo autor. 1 – Corpo de prova, 2 – Penetrador, 3 – Sede inferior, 4 – Sede de fixação, 5 – Medidor de deflexão

### **1.2. Sistema de teste**

A máquina para execução do ensaio deve ser equipada com o dispositivo de teste para fixar e carregar o corpo de prova de SPT, monitorada por um sistema de medição de carga e deslocamento. O erro permitido para medição da força aplicada deve ser de  $\pm 1\%$  conforme EN 10002. O sistema de teste deve ser calibrado anualmente.

### **1.3. Sistema de medição de deslocamento**

É permitido o uso de qualquer sistema de medição de deslocamento, sendo sua resolução de pelo menos  $\pm 1\%$  da espessura do corpo de prova.

### **1.4. Sistema de medição de deflexão**

É permitido o uso de qualquer sistema de medição de deflexão, sendo sua resolução de pelo menos  $\pm 1\%$  da espessura do corpo de prova. Pode ser conveniente a medição da deflexão do corpo de prova de forma indireta pelo monitoramento do deslocamento do medidor de deflexão conforme ilustrado na Figura 72.



### ***1.5. Sistema de aquecimento e resfriamento***

O sistema de aquecimento ou resfriamento deve ser capaz de distribuir de forma uniforme a temperatura por toda a secção do corpo de prova. No caso da execução do ensaio com o corpo de prova engastado, não é considerado o alojamento da sede inferior como parte do corpo de prova.

Devem ser utilizados termopares localizados de forma apropriada para determinar a temperatura em toda a secção do corpo de prova. Os termopares devem atender os requisitos da norma EN 10002.

O sistema de controle de temperatura deve ser capaz de manter o valor especificado para teste com uma variação de  $\pm 3K$ , conforme requisitos da norma EN 10002.

### ***1.6. Ambiente do teste***

Para condições onde o efeito das variações ambientais é relevante, esses parâmetros devem ser rigorosamente medidos e claramente registrados no relatório de teste.

### ***1.7. Medições adicionais***

Outros parâmetros podem ser monitorados, como crescimento e iniciação de trincas, campos de deslocamentos de forma contínua ou intermitente. Contudo, essas medições não podem interferir nos resultados do ensaio e seus dados devem ser registrados no relatório do ensaio.

### ***1.8. Gravação dos dados***

Os dados devem ser gravados por sistema de aquisição automática, com resolução compatível com o parâmetro medido.

## **2. Preparação do corpo de prova**

Para minimizar o trabalho de preparação da amostra, o corpo de prova deve ser usinado até a espessura aproximada de  $1,1 \times h$ , onde  $h$  é espessura final do corpo de prova. Nessa

espessura deve ser efetuado o desbaste com lixas de granulação 320 até 1200 onde a espessura final do corpo de prova deve ter uma tolerância de  $\pm 1\%h$ .

É recomendado o uso de corpo de prova na forma de um disco com  $d_1 = 8,0$  mm e  $h = 0,5$  mm. A espessura do disco deve ser medida em quatro posição ao redor do perímetro defasadas em  $90^\circ$  e uma medição na posição central do disco. O diâmetro deve ser medido em duas posições defasadas de  $90^\circ$ .

### ***2.1. Corpo de prova engastado***

É permitida a utilização de outras formas de corpo de prova nessa condição, podendo ser utilizado disco e quadrados. Pode ser utilizada espessuras de 0,2 até 0,6 mm.

### ***2.2. Corpo de prova livre***

O diâmetro do disco deve ser usinado com uma resolução de  $\pm 1\%d_1$ .

## **3. Temperatura de teste**

A temperatura de teste afeta significativamente a curva do ensaio, por essa razão deve ser mantida constante durante todo o teste. Qualquer método de aquecimento e resfriamento pode ser usado. O método de medição da temperatura do corpo de prova deve ser sensível e confiável para monitorar o corpo de prova durante todo o teste.

## **4. Procedimento de teste**

Posicionar o sistema de medição do deslocamento do penetrador, e se desejar, o sistema de medição de deflexão abaixo do centro do corpo de prova.

### ***4.1. Corpo de prova engastado***

Insira o corpo de prova centralizado sob o penetrador. Fixe a sede superior contra a sede inferior.

#### 4.2. *Corpo de prova livre*

Insira o corpo de prova centralizado sob o penetrador. O corpo de prova ficará solto entre a sede superior e a sede inferior. A folga entre o alojamento da sede inferior e o corpo de prova não deve exceder a 1%h. A sede inferior deve ser mantida na mesma posição durante todo o teste.

#### 4.3. *Velocidade de teste*

A velocidade de teste deve ser escolhida dentro dos limites da norma EN 10002. Devido a geometria do corpo de prova de SPT, a tensão e a deformação não são constantes durante a execução do teste, mesmo para uma taxa de deslocamento constante. Para a geometria recomendada no item 2, a formulação da equação 47 apresenta uma boa estimativa da taxa de deformação máxima  $\dot{\epsilon}_{SP}^{max}$  medida em  $[s^{-1}]$  dependendo da velocidade de penetração  $\nu$  medida em  $[m \cdot s^{-1}]$ :

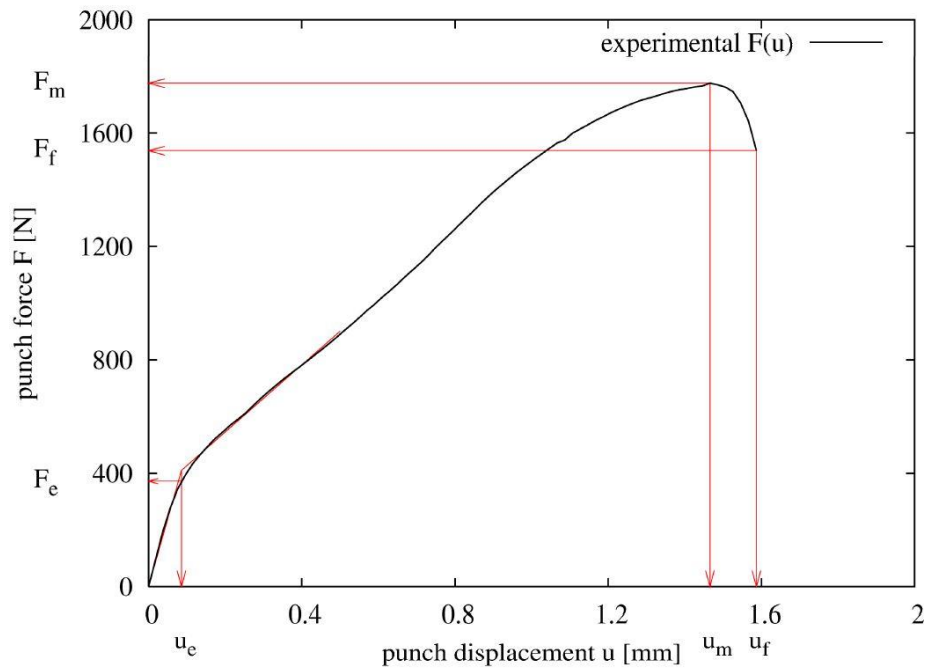
$$\dot{\epsilon}_{SP}^{max} \approx 1000 \cdot m^{-1} \cdot \nu \quad (47)$$

Em geral, é recomendada a taxa de deslocamento do penetrador entre 0,2 e 2 mm/min.

#### 4.4. *Registro do teste*

A Figura 73 ilustra a curva de deslocamento do penetrador (deformação do corpo de prova) vs. a carga aplicada para o ensaio SPT.

**Figura 73** – Representação da curva carga-deflexão durante o ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007).

Sendo que:

$F_m$  [N] = Carga máxima registrada durante o ensaio SPT;

$u_m$  [mm] = Deslocamento correspondente a carga  $F_m$ ;

$F_f$  [N] = Carga corresponde ao início da fratura registrada durante o ensaio SPT;

$u_f$  [mm] = Deslocamento correspondente a carga  $F_f$ ;

$F_e$  [N] = Carga que caracteriza a transição da linearidade elástica para a plasticidade devido a flexão durante o ensaio SPT;

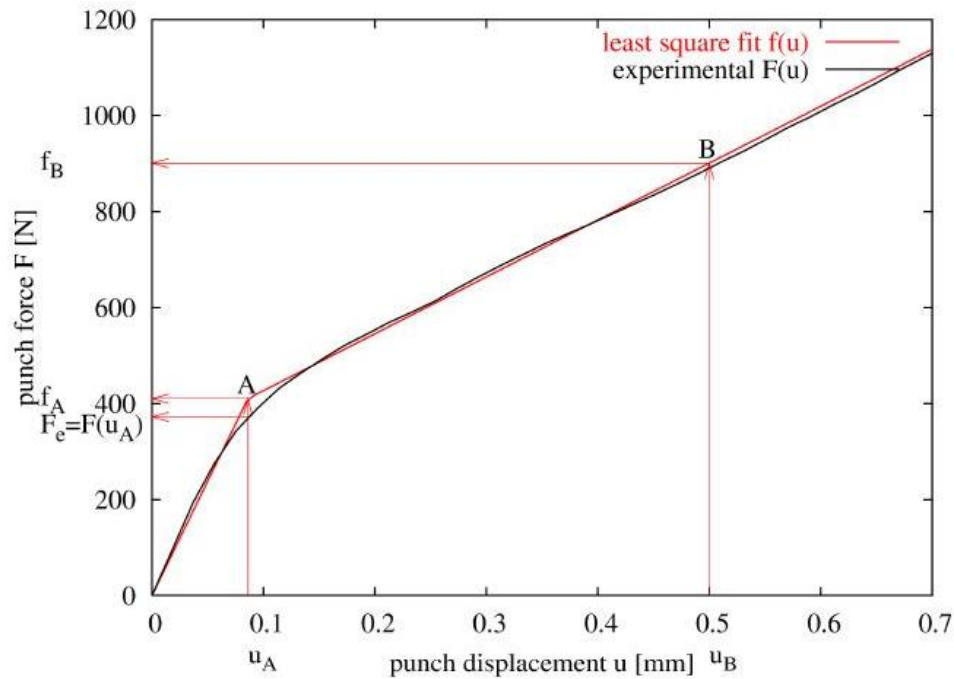
$u_e$  [mm] = Deslocamento correspondente a carga  $F_e$ ;

## 5. Tratamento dos dados do teste

### 5.1. Determinação da carga de transição elastoplástica

Após a execução do ensaio é necessário tratar os dados coletados. Assim é elaborada a curva ajustada do ensaio conforme ilustrado na Figura 74, para determinar o valor de  $F_e$ .

**Figura 74** – Representação da curva carga-deflexão ajustada após o ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007).

A curva  $F(u)$  representa os dados coletados durante o ensaio SPT.

A curva  $f(u)$  representa uma função bilinear da origem até os pontos A e B conforme a seguinte formulação:

$$f(u) = \frac{f_A}{u_A} u \quad \text{para } 0 \leq u \leq u_A$$

$$f(u) = \frac{f_B - f_A}{u_B - u_A} (u - u_A) + f_A \quad \text{para } u_A \leq u \leq u_B$$
(48)

Para minimização do erro, tem-se:

$$err = \int_0^{u_B} [F(u) - f(u)]^2 du$$
(49)

A curva  $f(u)$  então é obtida pelo melhor ajuste variando os valores de  $u_A$ ,  $f_A$  e  $f_B$  utilizando o método dos mínimos quadrados para compensar o erro.

Após os devidos ajustes, é possível obter o valor do deslocamento  $u_e = u_A$  e o valor da carga  $F_e = F(u_A)$ .

Para  $u_B$ , que é um parâmetro livre, é recomendado valores entre 0,3 e 0,5 mm para o patamar característico da curva de carga-deflexão. Contudo, uma escolha sugerida é que  $u_B = h$ , que é a espessura do corpo de prova.

### 5.2. Determinação da energia de fratura

A energia de fratura denominada  $E^{SP}$ , é definida como sendo área sob a curva carga-deflexão do ensaio SPT:

$$E^{SP} = \int_0^{u_f} F(u) du \quad (50)$$

Onde  $u_f$  é definido pela carga  $F_f$  como:

$$F_f = 0,8 \cdot F_m \quad (51)$$

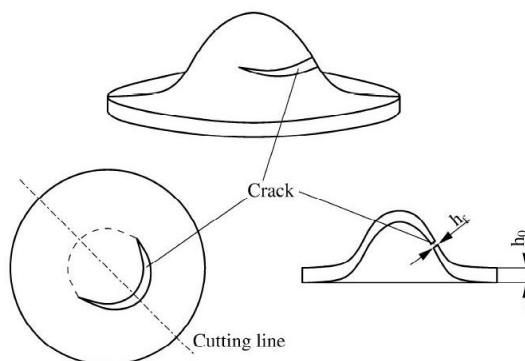
### 5.3. Determinação da deformação efetiva de fratura

A deformação efetiva de fratura, denominada  $\varepsilon_f$ , é definida como:

$$\varepsilon_f = \ln(h_0/h_f) \quad (52)$$

Onde  $h_0$  é a espessura original do corpo de prova e  $h_f$  é a espessura final do corpo de prova adjacente a área de falha. O corpo de prova deve ser seccionado após o ensaio conforme ilustrado na Figura 75.

**Figura 75** – Esquema do corte do corpo de prova após ensaio SPT.



Fonte: (CEN, 2007).