

**José Guilherme de Freitas Peres**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DO  
AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 USANDO O ENSAIO  
DE PUNÇIONAMENTO ESFÉRICO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2023**

**José Guilherme de Freitas Peres**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DO AÇO  
INOXIDÁVEL AISI 304 USANDO O ENSAIO DE  
PUNÇIONAMENTO ESFÉRICO**

**Projeto de Finalização de Curso** apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

**UBERLÂNDIA-MG**

**2023**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P437 Peres, José Guilherme de Freitas, 1998-  
2023 Avaliação da Tenacidade à Fratura do Aço Inoxidável  
AISI 304 Usando o Ensaio de Puncionamento Esférico  
[recurso eletrônico] / José Guilherme de Freitas Peres.  
- 2023.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Arencibia, Rosenda Valdés,  
1969-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III.  
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
 Rodovia BR 050, KM 78, Bloco 1D, 2º andar - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 2512-6773 - www.mecanica.ufu.br - cocme@ufu.br



### ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	FEMEC41100 - Projeto de Fim de Curso II				
Data:	22/11/2023	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:50
Matrícula do Discente:	11821EMC015				
Nome do Discente:	José Guilherme de Freitas Peres				
Título do Trabalho:	"AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 USANDO O ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO ESFÉRICO."				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	( X ) Sim ( ) Não				

Reuniu-se, em ambiente virtual, pela plataforma: Microsoft Teams, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, em 22/11/2023, assim composta: Prof. Dr. Luiz Eduardo dos Santos Paes - FEMEC/UFU, Eng. Dr. Luiz Fernando Maia de Almeida - LTAD/UFU e Profª. Drª. Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU, orientadora do candidato.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, Profª. Drª. Rosenda Valdés Arencibia - FEMEC/UFU, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir a senhora presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

( x ) Aprovado sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rosenda Valdes Arencibia**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/11/2023, às 15:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo dos Santos Paes**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/11/2023, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Fernando Maia de Almeida**, **Usuário Externo**, em 22/11/2023, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4957694** e o código CRC **3383C444**.

**Referência:** Processo nº 23117.079560/2023-80

SEI nº 4957694

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Claudinei e Maria Aparecida, e ao meu irmão, Murilo, pelo amor, apoio e incentivos durante toda a vida, em especial durante a minha carreira acadêmica.

À minha namorada, Luísa, pelo companheirismo, paciência e pela compreensão dos momentos que estive ausente.

À professora Dra. Rosenda Valdés Arencibia, pela paciência, disposição e ensinamentos durante a orientação deste trabalho.

Aos meus mentores, Dr. Luiz Fernando Maia de Almeida e Me. Rodrigo Freitas da Silva Alvarenga, pela amizade, paciência, discussões e ensinamentos.

A todos os colegas de LTAD, engenheiros, técnicos, professores e alunos.

Aos colegas de graduação, pelos bons anos que passamos juntos e pelo aprendizado em conjunto.

À Universidade Federal de Uberlândia e a todos os professores e técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica pela minha formação acadêmica.

PERES, J. G. F. AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 USANDO O ENSAIO DE PUNÇONAMENTO ESFÉRICO. 2023. 96 f. Projeto de Fim de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

## RESUMO

Este trabalho avaliou a tenacidade à fratura do aço inoxidável AISI 304 em duas direções usando o ensaio de puncionamento esférico instrumentado. Para tanto, foi utilizado a técnica de múltiplos corpos de prova entalhados lateralmente e as metodologias de análise de resultados dos métodos Lacalle e da Taxa de Alívio de Energia. Os resultados obtidos mostraram que ambas as metodologias são capazes de detectar a anisotropia do material, que apresentou maior tenacidade na direção longitudinal. Além disso, estes resultados estão dentro da faixa de valores esperados de tenacidade à fratura convencionais encontrados na literatura. Contudo, o método da taxa de alívio de energia apresentou, em média, dispersões nos resultados maiores que 32 %, revelando uma baixa repetibilidade que comprometem a qualidade e confiabilidade destes. Por outro lado, o método Lacalle obteve resultados de  $J_Q$  promissores e com baixa dispersão com médias de 492 kJ/m<sup>2</sup> para a direção longitudinal e 436 kJ/m<sup>2</sup> para a direção transversal. Além disso, os resultados obtidos por meio do método Lacalle foram comparados com os resultados de outros materiais submetidos ao mesmo método para proporcionar informações qualitativas da avaliação da tenacidade à fratura do AISI 304. Neste comparativo, o AISI 304 apresentou o maior valor de tenacidade dentre os aços analisados.

---

Palavras-chave: Tenacidade à Fratura. Ensaio de Puncionamento Esférico. Aço Inoxidável AISI 304.

PERES, J. G. F. EVALUATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF AISI 304 STAINLESS STEEL USING SMALL PUNCH TEST. 2023. 96 p. Course Conclusion Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

## ABSTRACT

This work evaluated the fracture toughness of AISI 304 stainless steel in two directions using the Small Punch Test. For this purpose, the multiple side notched specimen technique and the methodologies of the Lacalle's and Energy Release Rate methods was employed. The obtained results indicated that both methodologies are capable of detecting material anisotropy, showing higher toughness in the longitudinal direction. Additionally, these results are within the range of conventional fracture toughness values found in the literature. However, the Energy Release Rate method exhibited results with a mean dispersion greater than 32 %, indicating low repeatability and significant uncertainty values that compromise the quality and reliability of the results. On the other hand, the Lacalle's method yielded promising  $J_Q$  results with low dispersion of 492 kJ/m<sup>2</sup> in the longitudinal direction and 436 kJ/m<sup>2</sup> in the transversal direction. Furthermore, the results of Lacalle's method were compared with results from other materials subjected to the same method to provide qualitative information for the fracture toughness of AISI 304 steel. In this comparison, AISI 304 exhibited the highest toughness value among the analyzed steels.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modos de abertura de trinca. (a) Modo I; (b) Modo II; (c) Modo III (DOWLING, 2012).....	4
Figura 2.2 – Concentração de tensão devido a uma trinca em uma placa finita (ANDERSON, 2005).....	5
Figura 2.3 – Curva J-R típica para materiais dúcteis (ANDERSON, 2005). ....	7
Figura 2.4 – Esquema simplificado do dispositivo do ensaio SPT (ALMEIDA et al., 2021).....	9
Figura 2.5 – Curva Força x Deslocamento do <i>Small Punch Test</i> (GARCÍA et al., 2014).....	9
Figura 2.6 – Corpos de prova SPT, (a) convencional circular, (b) convencional quadrado, (c) entalhe central, (d) entalhe lateral, (e) entalhe circunferencial e (f) trinca lateral (TORRES E GORDON, 2021). ....	12
Figura 2.7 – (a) Corpo de prova entalhado e submetido a fadiga; (b) Sistema de medição de diferença de potencial e corrente para detecção do início de crescimento da trinca (FOULDS et al., 1995).....	13
Figura 2.8 – Curvas associadas ao crescimento da trinca de $a_0$ até $a_i$ (LACALLE, ÁLVAREZ E GUTIÉRREZ-SOLANA, 2008). ....	14
Figura 2.9 – Diferença de energia de corpos de prova com entalhes diferentes (ALEGRE et al., 2016).....	16
Figura 2.10 – Cálculo da Integral J via simulação numérico de corpos de prova entalhados (ALEGRE et al., 2016).....	16
Figura 3.1 – Microscopia do aço inoxidável AISI 304 nas direções Longitudinal (L), Transversal (T) e Transversal Menor (S). ....	19
Figura 3.2 – Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração. ....	20
Figura 3.3 – Geometria do corpo de prova entalhado (ALMEIDA et al., 2023). ....	21
Figura 3.4 – Projetor de Perfil para medição do comprimento do entalhe.....	22
Figura 3.5 – Equipamento de Puncionamento Esférico Instrumentado.....	24
Figura 3.6 – Componentes do dispositivo para ensaio SPT. ....	24
Figura 3.7 – (a) Dispositivo de posicionamento do CP; (b) CP posicionado. ....	25
Figura 3.8 – Área abaixo da curva que representa a energia necessária para a trinca crescer de $a_1$ para $a_2$ (ALMEIDA et al., 2023).....	26

Figura 3.9 – Fluxograma do Método Lacalle. ....	27
Figura 3.10 – Fluxograma do Método da Taxa de Alívio de Energia.....	28
Figura 3.11 – Interface do software de análise de dados para o método Lacalle. ....	29
Figura 3.12 – Visualização do prolongamento das curvas analisadas no software desenvolvido.....	29
Figura 4.1 – Curvas SPT originais para diferentes comprimentos de entalhe da direção longitudinal.....	33
Figura 4.2 – Curvas SPT processadas pelo método Lacalle da direção longitudinal. ....	34
Figura 4.3 – Curva J-R utilizando o CP1 como referência da direção longitudinal. ....	36
Figura 4.4 – Curvas J-R obtidas via método Lacalle para a direção longitudinal do aço AISI 304. ....	36
Figura 4.5 - Curvas SPT originais para diferentes comprimentos de entalhe da direção transversal. ....	38
Figura 4.6 - Curvas SPT processadas pelo método Lacalle da direção transversal.....	38
Figura 4.7 - Curva J-R utilizando o CP1 como referência da direção transversal.....	39
Figura 4.8 – Curva J-R utilizando o CP2 como referência da direção transversal.....	40
Figura 4.9 – Curvas J-R obtidas via método Lacalle para a direção transversal do aço AISI 304. ....	40
Figura 4.10 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,8 e 4,2 mm na direção longitudinal.....	42
Figura 4.11 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 4,2 e 4,5 mm na direção longitudinal.....	42
Figura 4.12 – Resultados de <i>JIC</i> para cada par de entalhes na direção longitudinal. As barras de erro representam $\pm$ o desvio padrão.....	43
Figura 4.13 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,8 e 4,2 mm na direção transversal. ....	44
Figura 4.14 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 4,2 e 4,5 mm na direção transversal. ....	45
Figura 4.15 - Resultados de <i>JIC</i> para cada par de entalhes na direção transversal. As barras de erro representam $\pm$ o desvio padrão.....	46
Figura 4.16 – Resultados dos valores de <i>J</i> dos métodos Lacalle e da Taxa de Alívio de Energia para o aço inoxidável AISI 304. As barras de erro representam $\pm$ o desvio padrão. ....	47
Figura 4.17 – Tenacidade à fratura $J_C$ de aços inoxidáveis austeníticos em diferentes temperaturas de ensaio (MILLS, 1996). ....	48
Figura B.1 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	59

Figura B.2 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	59
Figura B.3 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP3 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	60
Figura B.4 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	60
Figura B.5 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	61
Figura B.6 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP3 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	61
Figura B.7 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP3 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	62
Figura B.8 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP3 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	62
Figura B.9 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP3 como referência e CP3 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	63
Figura C.1 – Curva J-R construída utilizando o CP1 como referência na direção longitudinal. ....	64
Figura C.2 – Curva J-R construída utilizando o CP2 como referência na direção longitudinal. ....	64
Figura C.3 – Curva J-R construída utilizando o CP3 como referência na direção longitudinal. ....	65
Figura D.1 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	66
Figura D.2 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	66
Figura D.3 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	67
Figura D.4 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas. ....	67
Figura E.1 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,0 e 3,3 mm. ....	68
Figura E.2 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,3 e 3,5 mm. ....	68
Figura E.3 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,5 e 3,8 mm. ....	69

Figura F.1 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,0 e 3,3 mm. ....	70
Figura F.2 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,3 e 3,5 mm. ....	70
Figura F.3 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,5 e 3,8 mm. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados da análise de composição química (% em peso) do aço AISI 304 comparados aos requisitos especificados pela norma ASTM A240 (ASTM, 2023). .....	18
Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304. ....	20
Tabela 4.1 – Pares $J-\Delta a$ utilizando o CP1 como referência da direção longitudinal. ....	35
Tabela 4.2 - Pares $J-\Delta a$ utilizando o CP2 como referência da direção longitudinal. ....	35
Tabela 4.3 - Pares $J-\Delta a$ utilizando o CP3 como referência da direção longitudinal. ....	35
Tabela 4.4 – Resultados de $J_Q$ para a direção longitudinal do AISI 304. ....	37
Tabela 4.5 - Pares $J-\Delta a$ utilizando o CP1 como referência da direção transversal. ....	39
Tabela 4.6 - Pares $J-\Delta a$ utilizando o CP2 como referência da direção transversal. ....	39
Tabela 4.7 – Resultados de $J_Q$ para a direção transversal do AISI 304. ....	41
Tabela 4.8 – Resultados de $JIC$ para o método da taxa de alívio de energia na direção longitudinal. ....	43
Tabela 4.9 - Resultados de $JIC$ para o método da taxa de alívio de energia na direção transversal. ....	45
Tabela 4.10 – Resultados de $J_Q$ da literatura obtidos via método Lacalle. ....	48
Tabela A.1 – Verificação dimensional da espessura dos corpos de prova da direção longitudinal. ....	54
Tabela A.2 – Verificação dimensional do comprimento do entalhe dos corpos de prova da direção longitudinal. ....	55
Tabela A.3 – Verificação dimensional da espessura dos corpos de prova da direção transversal. ....	56
Tabela A.4 - Verificação dimensional do comprimento do entalhe dos corpos de prova da direção transversal. ....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Símbolos latinos:

$A(\%)$	Alongamento
$a$	Comprimento do entalhe
$a_0$	Comprimento do entalhe do CP de referência
$a_i$	Comprimento do entalhe do CP de análise
$B$	Espessura do CP
$b$	Ligamento remanescente do CP
$C$	Coefficiente ajustado experimentalmente para cálculo de J
$d_m$	Deslocamento no ponto de força máxima do ensaio SPT
$E$	Módulo de elasticidade
$G$	Taxa de alívio de energia
$G_C$	Taxa de alívio de energia crítica
$J$	Integral J
$J_Q$	Integral J para o offset de 0,2 mm na curva J-R
$J_{IC}$	Tenacidade à fratura elasto-plástica
$K_{IC}$	Tenacidade à fratura linear elástica
$K_I$	Fator de intensidade de tensão do modo I.
$m$	Constante adimensional na equação de cálculo do CTOD
$R$	Resistência à propagação da trinca
$t$	Espessura do corpo de prova
$t_0$	Espessura inicial do corpo de prova
$P_y$	Força de escoamento do ensaio SPT
$P_m$	Força máxima do ensaio SPT

### Símbolos gregos:

$\alpha_1$	Constante utilizada na equação de cálculo de $\sigma_{YS}$
$\beta_1$	Constante utilizada na equação de cálculo de $\sigma_{ut}$
$\gamma$	Constante utilizada na equação de cálculo de $A(\%)$

$\delta^*$	Deflexão do corpo de prova no momento na fratura
$\varepsilon_{qf}$	Deformação do corpo de prova no momento da fratura
$\sigma_{YS}$	Tensão limite de escoamento
$\sigma_{ut}$	Tensão limite de resistência à tração

**Siglas e abreviaturas:**

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEN	<i>Comissão Europeia de Normalização</i>
CFC	Cúbica de Face Centrada
CP	Corpo de Prova
CT	<i>Compact Tension</i>
CTOA	Crack Tip Opening Angle
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
FAD	<i>Failure Assessment Diagram</i>
SPT	<i>Small Punch Test</i>

# SUMÁRIO

<b>1. CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo principal	2
1.2 Objetivos secundário	2
<b>2. CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
2.1 Aços Inoxidáveis	3
2.2 Mecânica da Fratura	4
2.2.1 Modos de carregamento	4
2.2.2 Taxa de Alívio de Energia (G)	5
2.2.3 Fator Intensidade de Tensão	5
2.2.4 Integral-J e curva J-R	6
2.3 Ensaio de Puncionamento Esférico ( <i>Small Punch Test</i> )	7
2.3.1 Princípio de funcionamento	8
2.4 Tenacidade à fratura obtida por meio do SPT	10
<b>3. CAPÍTULO III - METODOLOGIA</b>	<b>18</b>
3.1 Caracterização dos materiais dos corpos de prova	18
3.1.1 Análise de composição química	18
3.1.2 Análise metalográfica	19
3.1.3 Propriedades mecânicas	20
3.2 Fabricação dos corpos de prova	21
3.3 Ensaio de puncionamento esférico	22
3.4 Avaliação da tenacidade à fratura	25
3.4.1 Método Lacalle	25
3.4.2 Método da Taxa de Alívio de Energia	27

3.5 <i>Software</i> para processamento de dados e análise de resultados	28
<b>4. CAPÍTULO IV – RESULTADOS</b>	<b>30</b>
4.1 Resultados dos ensaios SPT	30
4.2 Resultados Método Lacalle	33
4.2.1 Direção Longitudinal	33
4.2.2 Direção Transversal	37
4.3 Resultados do Método da Taxa de Alívio de Energia	41
4.3.1 Direção Longitudinal	41
4.3.2 Direção Transversal	44
4.4 Discussões	46
<b>5. CAPÍTULO V – CONCLUSÃO</b>	<b>49</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	50
<b>6. CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE A – VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL DOS CORPOS DE PROVA DE ENSAIO DE PUNÇONAMENTO ESFÉRICO</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE B – CURVAS DE RESPOSTA ORIGINAIS E PROCESSADAS DO MATERIAL AISI 304 NA DIREÇÃO LONGITUDINAL</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE C – CURVAS J-R DO AÇO AISI 304 NA DIREÇÃO LONGITUDINAL</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE D – CURVAS DE RESPOSTA ORIGINAIS E PROCESSADAS DO MATERIAL AISI 304 NA DIREÇÃO TRANSVERSAL</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE E – CURVAS RESULTANTES DO MÉTODO DA TAXA DE ALÍVIO DE ENERGIA PARA A DIREÇÃO LONGITUDINAL</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE F – CURVAS RESULTANTES DO MÉTODO DA TAXA DE ALÍVIO DE ENERGIA PARA A DIREÇÃO TRANSVERSAL</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MICRÔMETRO DIGITAL</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PROJETOR DE PERFIL</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMOHIDRÔMETRO DIGITAL</b>	<b>78</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A tenacidade à fratura é o parâmetro utilizado para quantificar a resistência do material à propagação de uma trinca. A medição experimental e padronização da tenacidade à fratura desempenham um papel crucial na aplicação de métodos da mecânica da fratura para a avaliação da integridade estrutural, análise de resistência residual, avaliação de adequação ao serviço (*Fitness for Service*) e de estruturas de engenharia. Os valores de tenacidade à fratura também podem servir como caracterização de materiais, avaliação de desempenho e certificação de qualidade para estruturas de engenharia, quais sejam: vasos de pressão, tubulações nucleares, tanques petroquímicos, oleodutos e gasodutos e estruturas automotivas, aeronáuticas e navais (ZHU e JOYCE, 2012).

Dessa forma, a avaliação da tenacidade à fratura dos materiais desempenha um papel crucial na segurança e confiabilidade de estruturas e componentes de diversas indústrias. À medida que a tecnologia se desenvolve, essa dificuldade aumenta gradualmente, pois tecnologias mais complexas implicam, conseqüentemente, em fraturas e comportamentos estruturais mais difíceis de serem previstos. Anderson (2005) apresentou um estudo econômico que estimou que em 1978 o custo anual devido às fraturas dos materiais nos Estados Unidos era de 119 bilhões de dólares, correspondente a 4 % do produto interno bruto do país. Além disso, o estudo mostrou que apenas com os conhecimentos de mecânica da fratura da época seria possível reduzir esses custos em 35 bilhões de dólares, caso essas tecnologias fossem aplicadas.

Os principais parâmetros da mecânica da fratura utilizados no projeto e reparo de equipamentos são o fator de intensidade de tensão ( $K$ ), a taxa de alívio de energia ( $G$ ), a integral  $J$ , o deslocamento de abertura da ponta da trinca (CTOD) e o ângulo de abertura da ponta da trinca (CTOA) (ZHU e JOYCE, 2012). Diferentes métodos experimentais foram desenvolvidos para determinar esses parâmetros que descrevem a tenacidade à fratura dos materiais. Esses métodos são descritos e padronizados nas normas ASTM E1820

(ASTM, 2023) e ISO 12135 (ISO, 2019), os quais têm sido amplamente utilizados para avaliar a tenacidade à fratura e são os mais precisos (ZHANG et al., 2020).

No entanto, ensaios para determinar a tenacidade à fratura são dependentes das dimensões do corpo de prova. Essas dimensões são definidas em função das propriedades mecânicas do material, como o limite de escoamento, ductilidade e a própria tenacidade à fratura, objetivando garantir condição de estado plano de deformação. Para materiais com baixo limite de escoamento e elevada tenacidade, os corpos de prova podem ter dimensões significativas. Desta forma, uma quantidade considerável de material é requerida, bem como o uso de máquinas de ensaio de elevada capacidade, muitas vezes superior à capacidade das máquinas de ensaio disponíveis no mercado (ANDERSON, 2005; DOWLING, 2012).

Com o objetivo de superar essas dificuldades e limitações, diversos estudos têm sido desenvolvidos para a avaliação da tenacidade à fratura utilizando os ensaios de puncionamento esférico (*Small Punch Test - SPT*). Este ensaio consiste na deformação de um corpo de prova por meio da ação de um punção esférico, em que a força exercida pelo punção e seu deslocamento são medidos. A partir da curva de resposta (força x deslocamento) é possível avaliar propriedades mecânicas como o limite de escoamento, limite de resistência e propriedades de fluência. Além disso, esse ensaio tem como principal vantagem o pequeno volume de material ensaiado, caracterizando como um ensaio quase não destrutivo (ALMEIDA, 2022). O ensaio SPT apresenta grande potencial e diversas formulações e técnicas foram propostas para avaliar a tenacidade à fratura por meio do SPT (GORDON, 2021).

## **1.1 Objetivo principal**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar e validar duas metodologias já existentes para obter a tenacidade à fratura do aço inoxidável AISI 304 por meio do ensaio SPT utilizando corpos de prova entalhados.

## **1.2 Objetivos secundário**

Desenvolver um *software* para processamento de dados e análise de resultados para as duas metodologias estudadas, com o objetivo de otimizar o tempo de análise de resultados.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado a revisão bibliográfica. Inicialmente é abordado o que são aços inoxidáveis, suas características e aplicações. Em seguida, é feito um breve resumo dos principais conceitos de mecânica da fratura discutidos neste trabalho. Além disso, é descrito o desenvolvimento do ensaio de puncionamento esférico, bem como seu princípio de funcionamento. Por fim, é abordado o estado da arte a respeito da avaliação da tenacidade à fratura por meio do ensaio de puncionamento esférico.

#### 2.1 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis possuem uma ampla gama de aplicações, seja em indústrias petroquímicas, automobilísticas e navais ou em indústrias alimentícias e farmacêutica devido à sua elevada resistência à oxidação e corrosão. A adição de cromo (superior a 12 %) confere aos aços inoxidáveis a capacidade de formar uma camada protetora de óxidos mistos na superfície do material, conhecida como passivação. A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis está diretamente relacionada com a formação da camada passiva, a sua impermeabilidade e a baixa taxa de dissolução em meio corrosivo (SILVA e MEI, 1988).

A classificação dos aços inoxidáveis é baseada em sua microestrutura à temperatura ambiente, a qual exerce influência significativa sobre suas propriedades. Os principais tipos de aços inoxidáveis são os martensíticos, ferríticos, austeníticos e *duplex*.

Os aços inoxidáveis austeníticos, compostos por ferro, cromo (16-30 %) e níquel (8-35 %), apresentam uma microestrutura predominantemente austenítica em temperatura ambiente, estabilizada pela adição de níquel (SILVA e MEI, 1988). A estrutura austenítica (cúbica de face centrada – CFC) confere a esses materiais boa resistência à corrosão, alta tenacidade e boa soldabilidade. Além disso, os aços austeníticos mantêm suas características

tanto em aplicações criogênicas (sem transição dúctil-frágil) quanto em temperaturas elevadas, sendo o mais indicado quando é necessário garantir a tenacidade para uma ampla faixa de temperaturas (MILLS, 1996).

## 2.2 Mecânica da Fratura

Nessa seção é apresentado o resumo dos principais conceitos de mecânica da fratura abordados neste trabalho.

### 2.2.1 Modos de carregamento

A Figura 2.1 mostra os modos básicos de carregamento. Uma trinca pode estar submetida a apenas um ou a uma combinação destes três modos. O Modo I (Fig. 2.1a), chamado de modo de tração (*Opening Mode*), consiste na abertura da trinca por meio de um esforço uniaxial de tração perpendicular à direção da trinca, separando as superfícies da trinca. Por sua vez, o Modo II (Fig. 2.1b), denominado de modo de cisalhamento (*In-Plane Shear*), consiste na abertura da trinca por meio de um esforço cisalhante normal à direção da ponta da trinca, deslizando uma superfície em relação à outra na mesma direção da trinca. Por fim o Modo III (Fig. 2.1c), chamado de modo de rasgamento (*Out-of-Plane Shear*), também decorre por meio de um esforço cisalhante, mas paralelo à direção da ponta da trinca, ocasionando o deslizamento das superfícies da trinca perpendicular à direção da ponta da trinca (DOWLING, 2012).

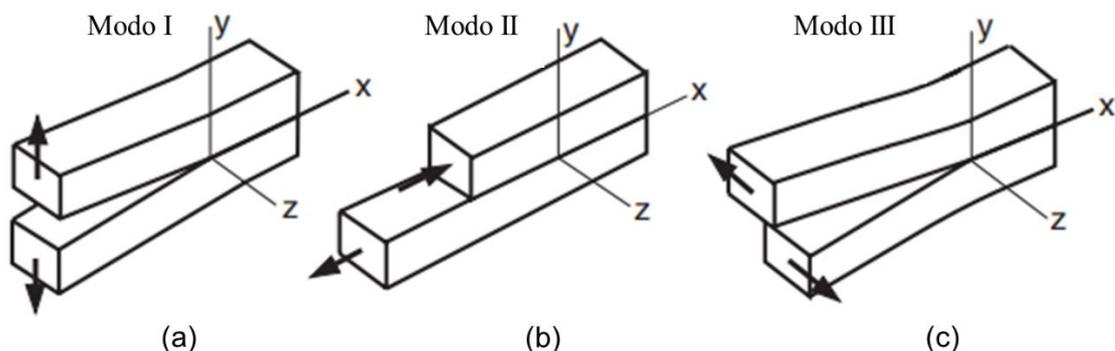


Figura 2.1 – Modos de abertura de trinca. (a) Modo I; (b) Modo II; (c) Modo III (DOWLING, 2012)

### 2.2.2 Taxa de Alívio de Energia (G)

A Taxa de Alívio de Energia (Eq. (2.1)) é a taxa de variação de energia potencial ( $dU$ ) por unidade de área da trinca ( $t \cdot da$ ). Este é o conceito físico que controla o crescimento da trinca e seu comportamento. Uma trinca só irá se estender de um comprimento  $a$  para  $a + da$  se e somente se o valor de  $G$  for maior do que o valor da resistência à propagação da trinca ( $R$ ).

$$G = -\frac{1}{t} \frac{dU}{da} \quad (2.1)$$

Sendo assim, se  $R > G$  não há crescimento da trinca e, se  $G > R$  há o crescimento da trinca. Além disso, a taxa de variação de  $G$  e de  $R$  define se o crescimento da trinca é estável ou instável.

### 2.2.3 Fator Intensidade de Tensão

O fator de intensidade de tensão ( $K$ ) é um fator que caracteriza a concentração de tensões na ponta de uma trinca de um material linear-elástico e isotrópico, sendo possível determinar as tensões em qualquer ponto na frente da trinca. Esse efeito é consequência da descontinuidade causada pela presença da trinca, que resulta no acúmulo das linhas de tensões nas extremidades da trinca, como exibido na Fig. 2.2.

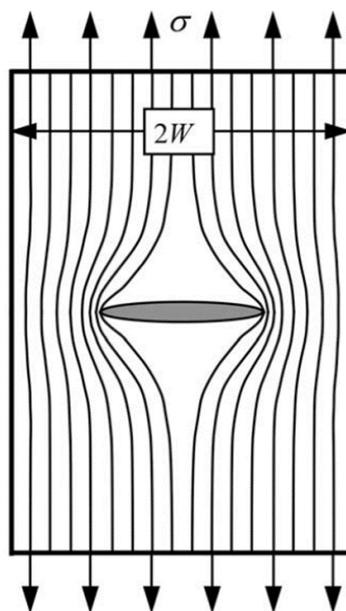


Figura 2.2 – Concentração de tensão devido a uma trinca em uma placa finita (ANDERSON, 2005).

A magnitude da tensão na ponta da trinca pode ser determinada pelos valores de K para cada modo de carregamento ( $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$ ), como apresentado na Eq. (2.2).

$$K = F \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2.2)$$

Na Equação 2.2, F é um fator de correção geométrico,  $\sigma$  é a tensão na ponta da trinca e  $a$  é o comprimento da trinca.

O valor de K possui um valor crítico  $K_C$  no qual ocorre a fratura instável do material. O valor de  $K_{IC}$  pode ser determinado a partir de ensaios normalizados pela ASTM E399 (ASTM, 2023) como CT (*Compact Specimen*), SENB (*Single-Edge-Notched Bend*), etc. No entanto, ensaios para determinar  $K_{IC}$  podem ser caros e complexos, pois dependem de corpos de prova suficientemente grandes para garantir a condição de estado de deformação plana e que o corpo de prova se comporte de maneira linear elástica. Além disso, há as limitações dos equipamentos de ensaios que podem não serem capazes de suportar grandes forças ou grandes deformações (ANDERSON, 2005; DOWLING, 2012).

#### 2.2.4 Integral-J e curva J-R

A Integral-J é a Taxa de Alívio de Energia em um material elástico não linear, sendo considerado uma generalização da Taxa de Alívio de Energia G. Contudo, para materiais elastoplásticos o conceito da Integral-J difere do conceito da Taxa de Alívio de Energia, pois além da energia para geração de novas superfícies da trinca há a dissipação de energia por deformação plástica. Apesar disso, a Integral-J para materiais elastoplástico atua como uma medida da intensidade dos campos de tensão e da deformação elastoplástica ao redor da ponta da trinca.

O método da Integral-J supera as limitações de materiais linear-elástico, bem como a necessidade de corpos de prova de grandes dimensões quando comparados aos ensaios para determinar o valor de K. Porém, o ensaio de tenacidade à fratura para determinar a Integral-J de materiais elastoplásticos possui grande complexidade devido a combinação do crescimento da trinca e a deformação plástica ocorrerem simultaneamente.

A curva J-R, ou curva de resistência à propagação da trinca, é utilizada para determinar o valor de J no qual há o início de crescimento estável da trinca. Esse valor é determinado de forma arbitrária, análogo ao *offset* de 0,2 % de deformação para determinar o limite de escoamento, o valor de  $J_{IC}$  é determinado a partir de um *offset* de 0,2 mm de crescimento de trinca, este valor é inicialmente denominado de  $J_Q$  e caso o ensaio seja considerado válido é dito que  $J_Q$  é igual a  $J_{IC}$ , que é a propriedade de tenacidade à fratura do material. A Figura 2.3

apresenta um exemplo ilustrativo da curva J-R no qual é possível observar o arredondamento da ponta da trinca, bem como o início de crescimento estável da trinca, o qual é utilizado para determinar a tenacidade à fratura do material.

A curva J-R fornece informações mais abrangentes do que apenas o valor de  $J_{Ic}$ . A inclinação da curva após o início de crescimento da trinca fornece informações relativas à estabilidade do crescimento da trinca. Quanto mais horizontal for a curva, maior a probabilidade de propagação instável da trinca, enquanto uma inclinação mais íngreme indica maior estabilidade no crescimento da trinca (ANDERSON, 2005).

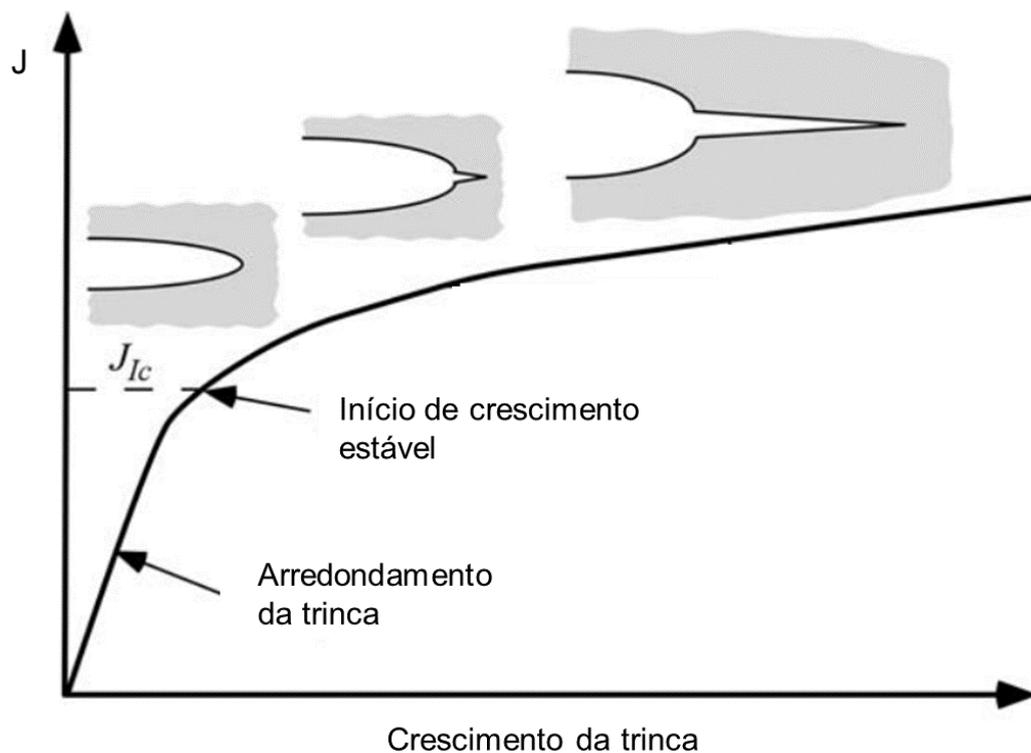


Figura 2.3 – Curva J-R típica para materiais dúcteis (ANDERSON, 2005).

### 2.3 Ensaio de Puncionamento Esférico (*Small Punch Test*)

O ensaio de puncionamento esférico (*Small Punch Test* - SPT) foi inicialmente desenvolvido na década de 1980 por Manahan et al. (1981) devido a necessidade de avaliar as propriedades mecânicas de materiais que são submetidos a degradação ao longo do tempo por efeito da radiação de nêutrons em indústrias termonucleares. Para isso, foi desenvolvida uma tecnologia capaz de estimar as propriedades mecânicas utilizando corpos de provas

miniaturizados (discos de 3,0 mm de diâmetro e espessura de 0,250 mm) em função das questões de segurança e das limitações quanto às dimensões dos corpos de prova de materiais irradiados (ALMEIDA, 2017).

A técnica desenvolvida mostrou-se particularmente útil para analisar componentes de equipamentos em operação que são sujeitos a diversos fenômenos de degradação ao longo do tempo, reduzindo sua vida útil, como grandes variações de temperatura, ambientes corrosivos e elevados estados de tensão. Desta maneira, expandindo sua área de aplicação para as mais diversas indústrias como as de óleo e gás, aeronáutica, naval e de usinas de vapor (ALMEIDA, 2022; TORRES e GORDON, 2021).

Além disso, os corpos de provas miniaturizados permitem analisar as propriedades mecânicas do material ao longo de sua seção, bem como possibilitam a avaliação de regiões que seria impossível usinar corpos de prova convencionais como soldas ou revestimentos (BRITO, 2022; GARCÍA et al., 2014).

### 2.3.1 Princípio de funcionamento

Em 2020, foi publicada a norma ASTM E3205-20 (ASTM, 2020) que sintetiza as principais diretrizes para realização e padronização dos ensaios SPT propostas pela CWA 15627 (CEN, 2007). A norma enfatiza os métodos aceitos para determinar os parâmetros de força de escoamento e energia do ensaio SPT, bem como as propriedades de limite de escoamento, limite de resistência e temperatura de transição dúctil-frágil. Entretanto, a norma não aborda os procedimentos para obtenção da tenacidade à fratura, dada a ampla variedade de metodologias existentes, e a discussão sobre a pertinência desses métodos ainda é um tópico em debate (GARCÍA et al., 2014).

A Figura 2.4 ilustra um esquema de dispositivo do ensaio SPT. O princípio de funcionamento do ensaio consiste no puncionamento de uma haste metálica (1) em contato com uma esfera de metal duro (2) que deforma o corpo de prova (5) até a sua ruptura. O corpo de prova (CP) é centralizado e rigidamente fixado entre as matrizes superior (2) e inferior (3) (ALMEIDA, 2022; BRITO, 2022).

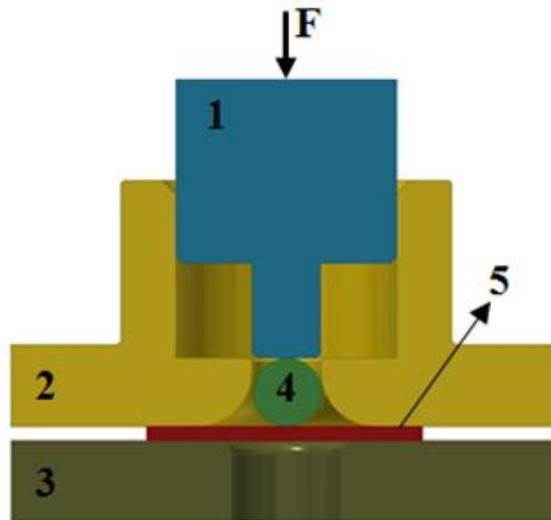


Figura 2.4 – Esquema simplificado do dispositivo do ensaio SPT (ALMEIDA et al., 2021).

Assim, é obtida uma curva de força por deslocamento do punção ou de força por deflexão do CP, como exibido na Fig. 2.5, que permite determinar diversas propriedades mecânicas. Esta curva pode ser dividida em quatro estágios de deformação: (I) deformação elástica, (II) início de deformação plástica, (III) regime de estiramento de membrana e (IV) propagação da trinca principal e ruptura do CP (ALMEIDA, 2022; GARCÍA et al., 2014).

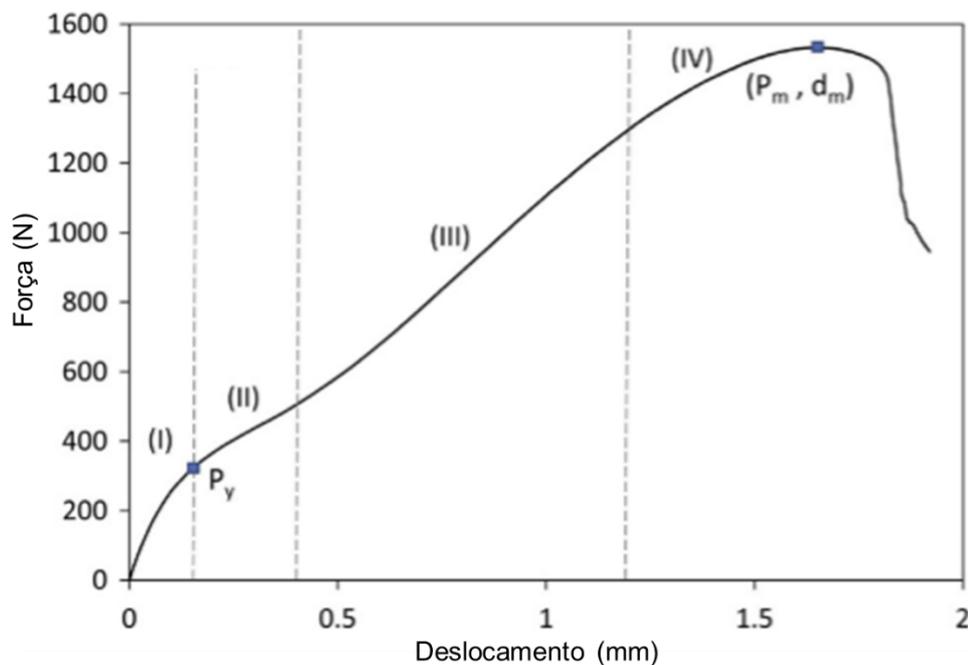


Figura 2.5 – Curva Força x Deslocamento do *Small Punch Test* (GARCÍA et al., 2014).

Rodríguez et al. (2009) salientaram que, devido à complexidade do estado de tensão durante o ensaio SPT, os trabalhos desenvolvidos focaram-se em obter relações empíricas entre as propriedades dos materiais e os estágios característicos da Figura 2.5. Sendo que os principais pontos para determinar as propriedades mecânicas são a força de escoamento ( $P_y$ ), a força máxima ( $P_m$ ) e o deslocamento no ponto de força máxima ( $d_m$ ).

As principais relações empíricas para determinar as propriedades dos materiais utilizando o SPT estão resumidas a seguir (ALMEIDA et al., 2022). O limite de escoamento é determinado a partir de uma relação linear com a força de escoamento normalizada pela espessura do CP ( $t$ ) ao quadrado, conforme a Eq. (2.3), em que  $\alpha_1$  é uma constante dependente do material.

$$\sigma_{YS} = \alpha_1 \cdot \frac{P_y}{t^2} \quad (2.3)$$

O limite de resistência é determinado pela relação com a força máxima de ensaio, espessura do CP ( $t$ ) e o deslocamento no ponto de força máxima ( $d_m$ ), conforme a Eq. (2.4), na qual  $\beta_1$  é uma constante dependente do material.

$$\sigma_{ut} = \beta_1 \cdot \frac{P_m}{t \cdot d_m} \quad (2.4)$$

## 2.4 Tenacidade à fratura obtida por meio do SPT

Nos últimos anos, surgiram diversas metodologias para estimar as propriedades de fratura dos materiais a partir de ensaios SPT. Isso reflete o interesse crescente em aproveitar essa técnica para obter informações sobre características mecânicas dos materiais de maneira quase não destrutiva e eficiente.

Considerando que a correlação entre a deformação biaxial equivalente da fratura, ou seja, o quanto o material deformou durante o ensaio, e a tenacidade a fratura ( $J_{Ic}$ ) é linear para deformações superiores a 0,2 %, Mao et al. (1991) propuseram que a tenacidade de materiais dúcteis pode ser obtida por meio da Eq. (2.5).

$$J_{Ic} = 280 \cdot \varepsilon_{qf} - 50 \quad (2.5)$$

Na Equação (2.5),  $J_{Ic}$  [kJ/m<sup>2</sup>] é a tenacidade a fratura dúctil e  $\varepsilon_{qf}$  é a deformação do corpo de prova no momento da fratura, estimada pela Eq. (2.6).

$$\varepsilon_{qf} = 0,15 \cdot \left(\frac{\delta^*}{t_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6),  $\delta^*$  [mm] é a deflexão do corpo de prova na fratura e  $t_0$  [mm] é a espessura inicial do corpo de prova.

No caso de materiais frágeis, a tensão limite de resistência é a propriedade que domina a falha dos materiais. Mao et al. (1991) estimaram a tensão limite de resistência ( $\sigma_{ut}$ ) pela Eq. (2.7), na qual  $P_m$  [kN] é a força máxima, e, a partir dela, a tenacidade a fratura frágil ( $K_{Ic}$ ) pode ser calculada, como mostrado na Eq. (2.8).

$$\sigma_{ut} = 130 \cdot \frac{P_m}{t_0^2} - 320 \quad (2.7)$$

$$K_{Ic} = 0,07 \cdot (\sigma_{ut})^{2/3} \quad (2.8)$$

Contudo, as Equações (2.5) e (2.8) utilizadas para calcular a tenacidade à fratura via SPT apresentam restrições notáveis. Não é esperado que essas equações sejam independentes das propriedades dos materiais, dependendo principalmente dos limites de resistência e de escoamento. Além disso, as constantes utilizadas foram determinadas supondo que a trinca se inicia no ponto de força máxima do gráfico de força-deslocamento. No entanto, com frequência, a formação da trinca ocorre antes de atingir o ponto de força máxima, inclusive em materiais de natureza frágil (FOULDS et al., 1995).

Diante das limitações do procedimento proposto por Mao et al. (1991), Foulds et al. (1995) introduziram uma abordagem que se baseia no conceito de contínuo da tenacidade, e utilizou o SPT para calcular a densidade de energia de deformação necessária para iniciar uma trinca em um material sólido sem trincas. Para isso, foi utilizada uma câmera endoscópica para monitorar a superfície do CP e detectar o momento de início da propagação da trinca. Em seguida, a densidade de energia de deformação absorvida é utilizada como critério de falha em uma simulação numérica de um CP de ensaio de tenacidade convencional CT (*Compact Tension*). Assim, estima-se a tenacidade à fratura do material por meio da força capaz de atingir o critério de falha na ponta do entalhe de um CP de geometria convencional. Esta metodologia foi utilizada para ensaiar uma ampla variedade de materiais e erros de  $\pm 25\%$  foram observados.

Ao longo dos anos, vários pesquisadores têm explorado e proposto abordagens para avaliar a tenacidade dos materiais por meio de modificações nos corpos de prova SPT, principalmente com a introdução de entalhes. A Figura 2.6 mostra alguns exemplos de corpos de prova já utilizados para calcular a tenacidade à fratura por meio do SPT.

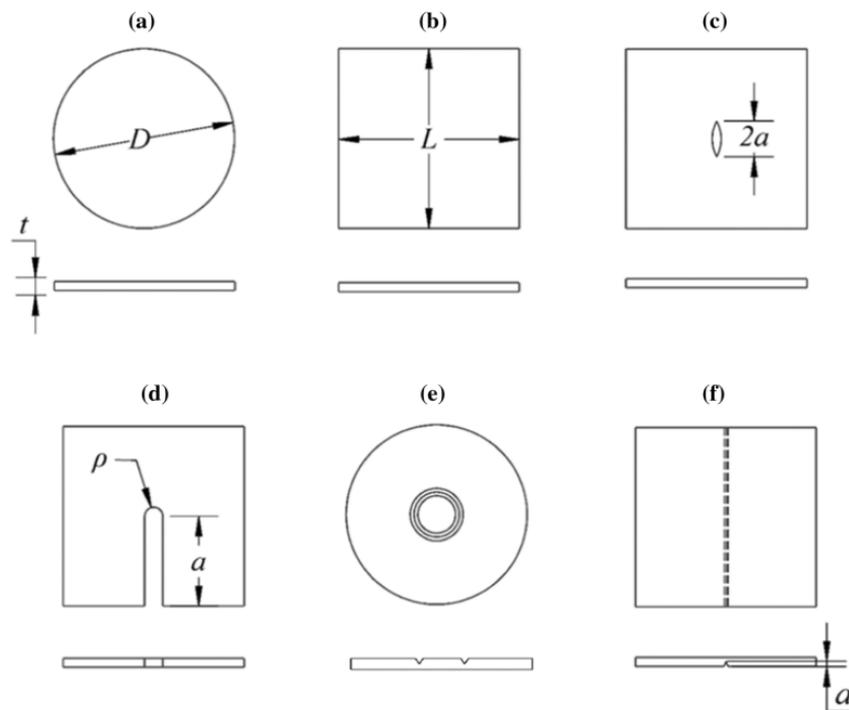


Figura 2.6 – Corpos de prova SPT, (a) convencional circular, (b) convencional quadrado, (c) entalhe central, (d) entalhe lateral, (e) entalhe circunferencial e (f) trinca lateral (TORRES E GORDON, 2021).

Tanaka et al. (2009) avaliaram a tenacidade a fratura de aço fundido CrMoV em altas temperaturas utilizando corpos de prova com entalhe central. O corpo de prova foi submetido a fadiga para que pré-trincas fossem formadas nas pontas do entalhe (Fig. 2.7a). Para detectar o momento de início de crescimento da trinca, foi imposta uma corrente no CP e a diferença de potencial nos terminais soldados nas pontas do entalhe foram medidas (Fig. 2.7b). Em seguida, a tenacidade do material foi estimada seguindo a metodologia proposta por Foulds et al. (1995).

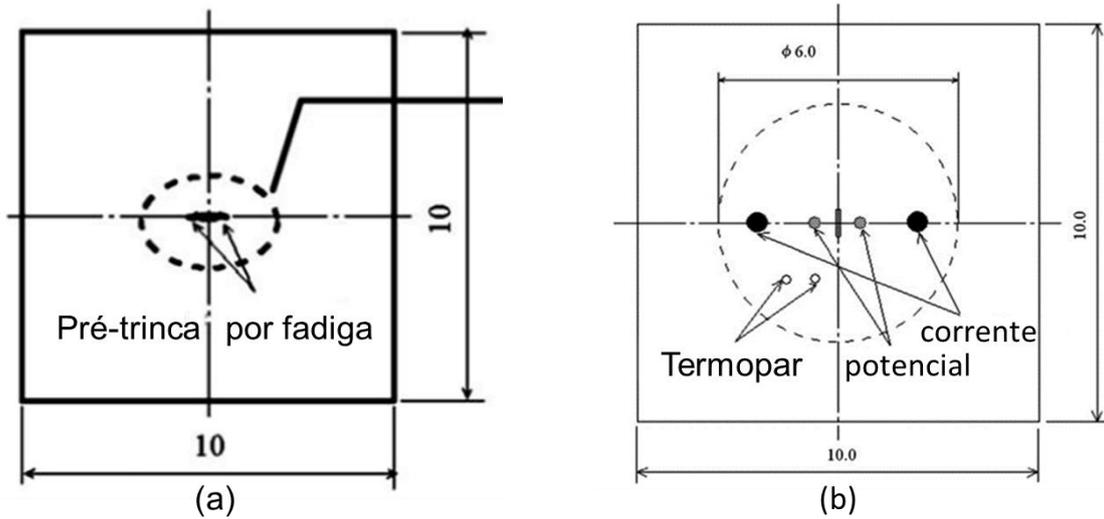


Figura 2.7 – (a) Corpo de prova entalhado e submetido a fadiga; (b) Sistema de medição de diferença de potencial e corrente para detecção do início de crescimento da trinca (FOULDS et al., 1995).

Lacalle, Álvarez e Gutiérrez-Solana (2008) desenvolveram uma metodologia para determinar a tenacidade a fratura baseada em ensaios de fratura convencionais (ASTM E1820, 2023). Para isso, foram utilizados corpos de prova modificados, com a usinagem de um entalhe lateral via eletroerosão a fio com diferentes comprimentos. Assim, é utilizado um comprimento de entalhe ( $a_0$ ) como referência e outros corpos de prova com comprimentos de entalhe ( $a_i \neq a_0$ ) para calcular a área abaixo do gráfico de referência até o ponto de prolongamento da força máxima do gráfico de  $a_i$ , como ilustrado na Fig. 2.8.

Deste modo, ao variar os comprimentos de entalhe  $a_i$ , é obtido um conjunto de valores de energia associados a diferentes crescimentos de trinca, de modo que os valores de tenacidade correspondentes podem ser calculados pela Eq. (2.9).

$$J = \frac{C \cdot U}{B \cdot b} \quad (2.9)$$

Na Equação (2.9), C é um coeficiente ajustado experimentalmente, Eq. (2.10), U é a área abaixo da curva SPT de referência até o prolongamento horizontal da força máxima da curva analisada, B é a espessura do corpo de prova e b é o ligamento remanescente do corpo de prova (comprimento do CP menos o comprimento do entalhe).

$$C = 0,12 + \frac{58 \cdot (a - d)}{\sigma_Y} \quad (2.10)$$

Na Equação (2.9),  $\sigma_Y$  é a média entre a tensão de escoamento e o limite de resistência a tração do material, “a” é o comprimento do entalhe e “d” é o comprimento da região de influência do aperto das matrizes.

Dessa maneira, é possível construir o gráfico de  $J \times \Delta a$  utilizando o conjunto de valores correspondentes de  $J$  e variações do comprimento do entalhe e, por conseguinte, estimar o valor da tenacidade a fratura do material.

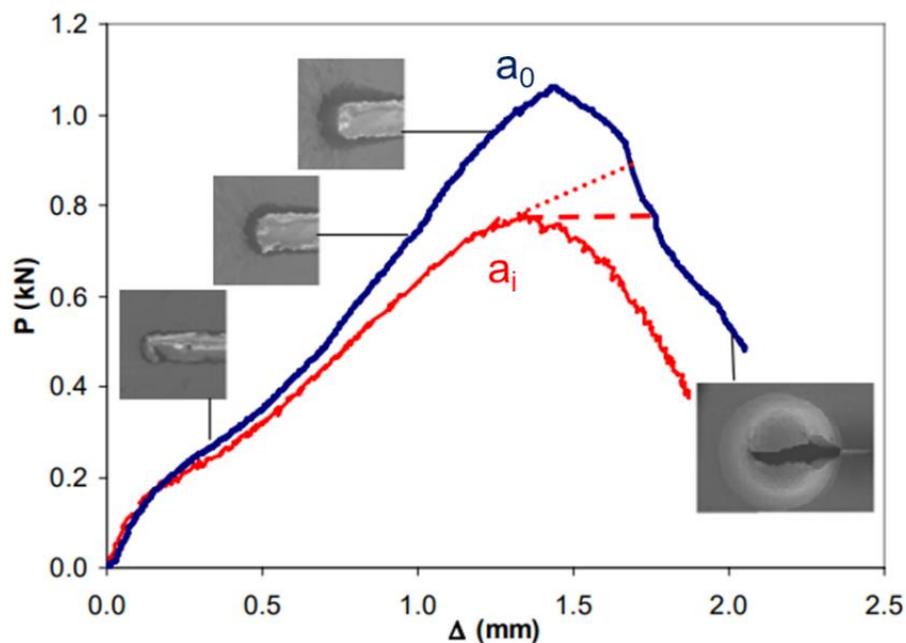


Figura 2.8 – Curvas associadas ao crescimento da trinca de  $a_0$  até  $a_i$  (LACALLE, ÁLVAREZ E GUTIÉRREZ-SOLANA, 2008).

Almeida et al. (2023) realizaram ensaios nos aços de elevada resistência (AISI 4130M, AISI 4137M e AISI 4340) e o gráfico de  $J \times \Delta a$  foi construído utilizando a técnica de múltiplos corpos de prova entalhados proposta por Lacalle et al. (2008). Os resultados foram comparados com aqueles decorrentes de ensaios convencionais e os erros foram inferiores a 13 % para os aços AISI 4130M e AISI 4340. Contudo, o aço AISI 4137M apresentou crescimento de trinca instável e não foi possível determinar a tenacidade deste material com boa exatidão.

Cuesta e Alegre (2011) apresentaram uma metodologia para estimar a tenacidade a fratura do aço inox martensítico endurecido 15,5 PH, utilizando o ensaio SPT com corpos de

provas com pré-trincas longitudinais não passantes fabricados via laser e o Diagrama de Avaliação de Falha (*Failure Assessment Diagram - FAD*).

Alegre, Cuesta e Barbachano (2014) e Alegre et al. (2016) compararam três diferentes metodologias para o cálculo da tenacidade a fratura em corpos de prova com entalhe lateral, o método CTOD, o método da Taxa de Alívio de Energia (*Energy Release Rate*) e o método de elementos finitos. O método CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) consiste em ensaios interrompidos onde é necessário medir a abertura do entalhe em Microscópio Óptico ou Microscópio Eletrônico de Varredura para estimar a tenacidade do material utilizando a Eq. (2.11).

$$CTOD = \frac{K_I^2}{m \cdot \sigma_y \cdot E} = \frac{G}{m \cdot \sigma_y} \quad (2.11)$$

Na Equação (2.11),  $K_I$  é o fator de intensidade de tensão do modo I,  $m$  é uma constante adimensional de valor  $m = 1$  para estado plano de tensão ou  $m = 2$  para estado plano de deformação,  $E$  é o módulo de elasticidade,  $\sigma_y$  é a tensão de escoamento e  $G$  é a taxa de alívio de energia.

O método da Taxa de Alívio de Energia consiste no ensaio de múltiplos corpos de prova com diferentes comprimentos de entalhe. Para uma trinca de comprimento  $a_1$  crescer até  $a_2 = a_1 + da$ , é necessária uma variação de energia  $\partial U$  (Fig. 2.9) e a taxa de alívio de energia pode ser calculada pela Eq. (2.12).

$$G = -\frac{1}{t} \left( \frac{U_2 - U_1}{a_2 - a_1} \right) \quad (2.12)$$

Na Equação (2.12),  $U_1$  e  $U_2$  são a energia sob o gráfico força-deslocamento de dois corpos de prova diferentes de entalhes  $a_1$  e  $a_2$  e  $t$  é a espessura do CP.

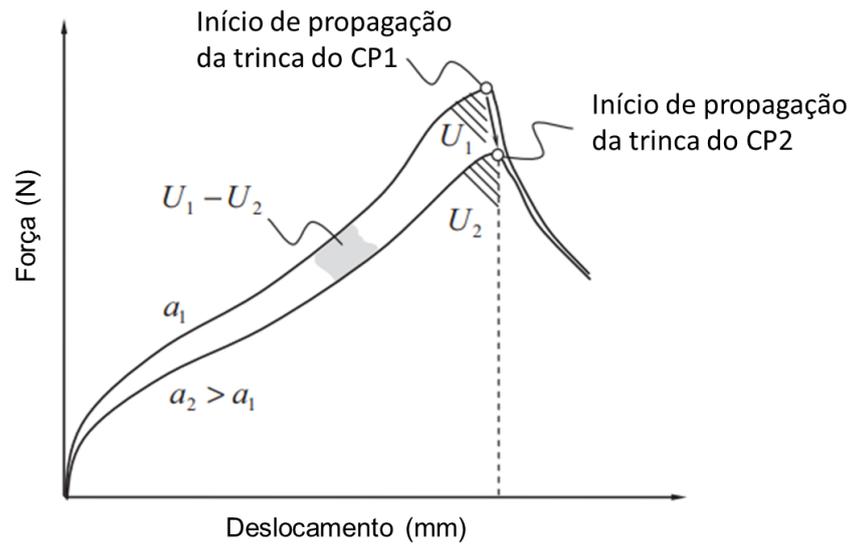


Figura 2.9 – Diferença de energia de corpos de prova com entalhes diferentes (ALEGRE et al., 2016).

Por fim, o método de elementos finitos consiste em simular a integral J a partir do ensaio SPT, construindo um gráfico Integral J x Deslocamento. Considerando que a trinca se inicia no ponto de força máxima, é obtido um valor crítico da Integral J no qual há a formação da trinca (Fig. 2.10).

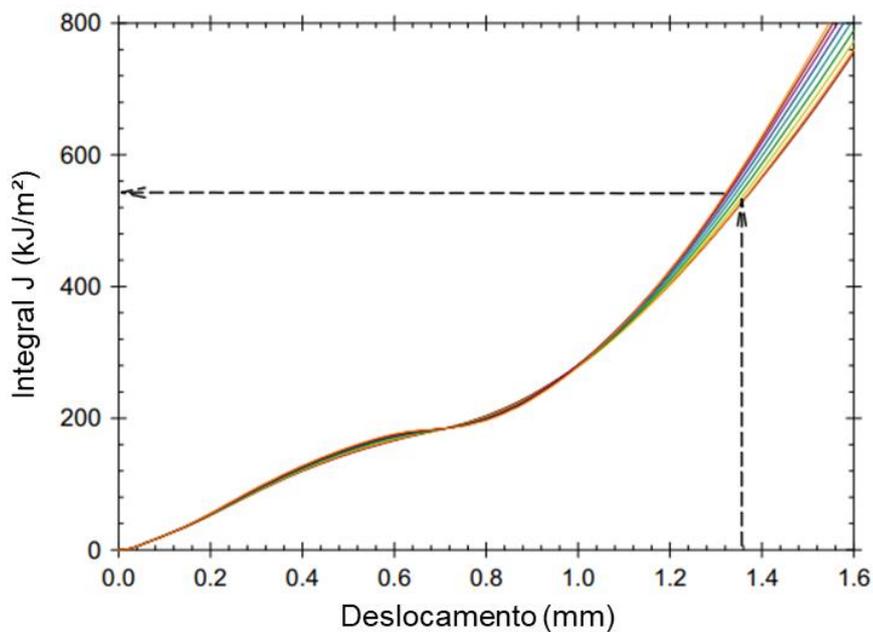


Figura 2.10 – Cálculo da Integral J via simulação numérica de corpos de prova entalhados (ALEGRE et al., 2016).

Turba et al. (2011) e Hurst, Li e Turba (2019) utilizaram corpos de prova com entalhe circular com o objetivo de criar uma distribuição de tensão simétrica em estado próximo ao de deformação plana. Assim, segundo os autores, seria possível a estimativa da tenacidade a fratura  $K_{IC}$  de materiais frágeis por meio do SPT.

Martinez-Pañeda et al. (2016) investigaram a capacidade da simulação via elementos finitos com modelo de dano dúctil (*Gurson-Tvergaard-Needleman Model*) do ensaio SPT em obter de forma confiável as propriedades de tenacidade a fratura dos materiais. Para isso foram estudadas diferentes geometrias de corpos de prova com pré-trinca (Longitudinal, Longitudinal + Transversal e Circular).

Além disso, diversos autores (LI et al., 2019; SHIKALGAR, DUTTA e CHATTOPADHYAY, 2020; ÁLVAREZ et al., 2020; LAI e JIANG, 2023) aplicaram o método dos elementos finitos para simular a falha macroscópica de corpos de prova SPT incorporando modelos de ruptura microscópico (Modelo de dano de Gurson-Tvergaard-Needleman). Esta abordagem ficou conhecida como *Local approach* e o procedimento para calcular a tenacidade a fratura envolve realizar o ensaio SPT, simular numericamente o ensaio SPT e determinar os parâmetros do modelo de Gurson específicos para o material. Em seguida, simular um corpo de prova de tenacidade convencional CT aplicando os parâmetros de Gurson obtidos para a construção do gráfico  $Jx\Delta a$ .

O SPT mostrou-se capaz de estimar as propriedades de tenacidade à fratura dos materiais, sendo que os corpos de prova entalhados mostraram ser promissores devido à maior similaridade com ensaios convencionais e pela praticidade dos ensaios. Entretanto, apesar das diversas metodologias propostas ao longo dos anos, nenhum método possui comprovações sólidas, com correlação direta com ensaios de tenacidade convencionais (TORRES E GORDON, 2021).

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia do trabalho, a qual foi dividida em cinco etapas, quais sejam: Caracterização do material, incluindo análise de composição química, análise metalográfica e ensaios de tração; Metodologia de fabricação e controle dimensional dos corpos de prova; Metodologia de execução dos ensaios experimentais. Metodologia de análise dos resultados para determinar a tenacidade à fratura do material e Desenvolvimento do *software* para tratamento e análise de dados.

#### 3.1 Caracterização dos materiais dos corpos de prova

##### 3.1.1 Análise de composição química

A análise de composição química foi realizada utilizando um espectrômetro de emissão ótica por descarga luminescente da marca LECO, modelo GDS500A, com resolução de 0,001 % em peso. Os resultados obtidos na medição e os requisitos especificados na norma ASTM A240 (ASTM, 2023) estão descritos na Tab. 3.1. Dos resultados obtidos é possível observar que a composição de Cromo (Cr) está abaixo do mínimo especificado pela norma.

Tabela 3.1 – Resultados da análise de composição química (% em peso) do aço AISI 304 comparados aos requisitos especificados pela norma ASTM A240 (ASTM, 2023).

Elemento	C	Mn	Cr	Ni	Si	P	S
<b>AISI 304</b> (% peso)	0,022	1,106	17,520	8,215	0,342	0,022	0,008
<b>ASTM-A240</b> (% peso)	0,08	2,0	18,0-20,0	8,0-11,0	0,075	0,045	0,03

### 3.1.2 Análise metalográfica

Para realizar a análise metalográfica do aço inoxidável AISI 304 foram retirados três corpos de prova para representar as três direções da chapa: Longitudinal (L), Transversal (T) e Transversal Menor (S). Os corpos de prova foram embutidos em baquelite, retificados e lixados progressivamente com lixas abrasivas de SiC de 400, 600 e 1200 *mesh*, utilizando uma lixadora Arotec, e polidos utilizando pastas de diamante com granulometrias médias de 9, 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$  em uma polidora Arotec VV. Em seguida, as amostras foram polidas com sílica coloidal de 0,04  $\mu\text{m}$  durante 3 minutos para obter o acabamento superficial requerido.

Logo em seguida do polimento, com a superfície do material ativa, foi realizado o ataque químico utilizando ácido oxálico 10 % para revelar a microestrutura. A análise metalográfica do aço inoxidável AISI 304 foi realizada em um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51M, equipado com câmera para aquisição de imagens. A partir das imagens foi possível identificar a microestrutura predominante de austenita e o bandeamento da estrutura cristalina devido ao processo de laminação da chapa. As imagens da microestrutura estão ilustradas na Fig. 3.1.

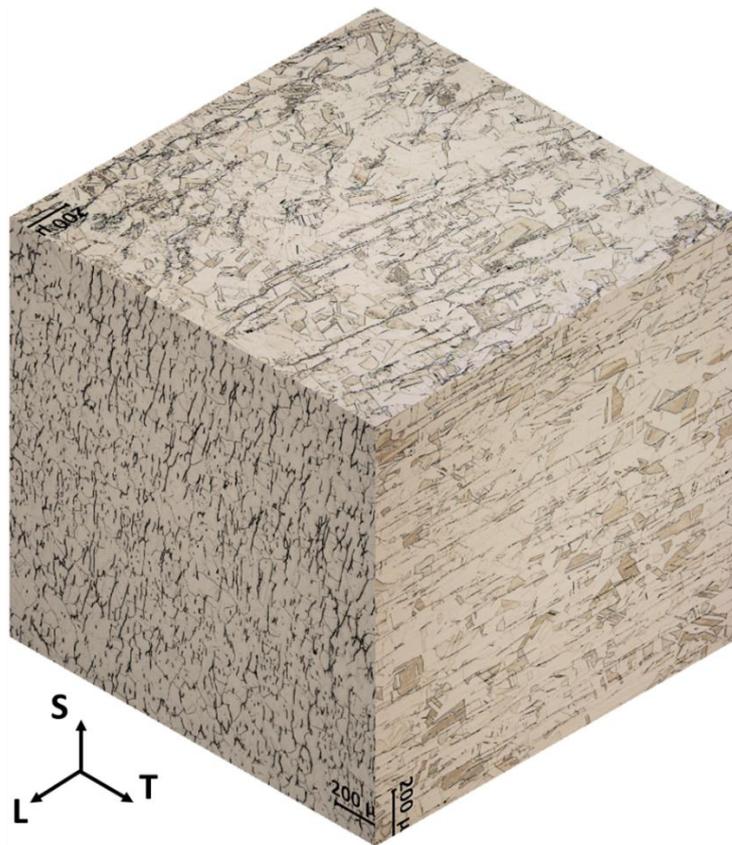


Figura 3.1 – Microscopia do aço inoxidável AISI 304 nas direções Longitudinal (L), Transversal (T) e Transversal Menor (S).

### 3.1.3 Propriedades mecânicas

Para determinar as propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração nas direções Longitudinal (L) e Transversal (T) em uma máquina de tração servohidráulica da fabricante Instron, modelo 8801. Os resultados obtidos para as propriedades de limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e módulo de Young são exibidos na Tab. 3.1 e o gráfico Tensão x Deformação é mostrado na Fig. 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do aço inoxidável AISI 304.

AISI 304	Limite de escoamento $\sigma_e$ (MPa)	Limite de resistência à tração $\sigma_{ut}$ (MPa)	Alongamento (%)
Direção L	225,6 ± 9,4	645,5 ± 6,9	86,1 ± 0,2
Direção T	244,6	634,0	82,6

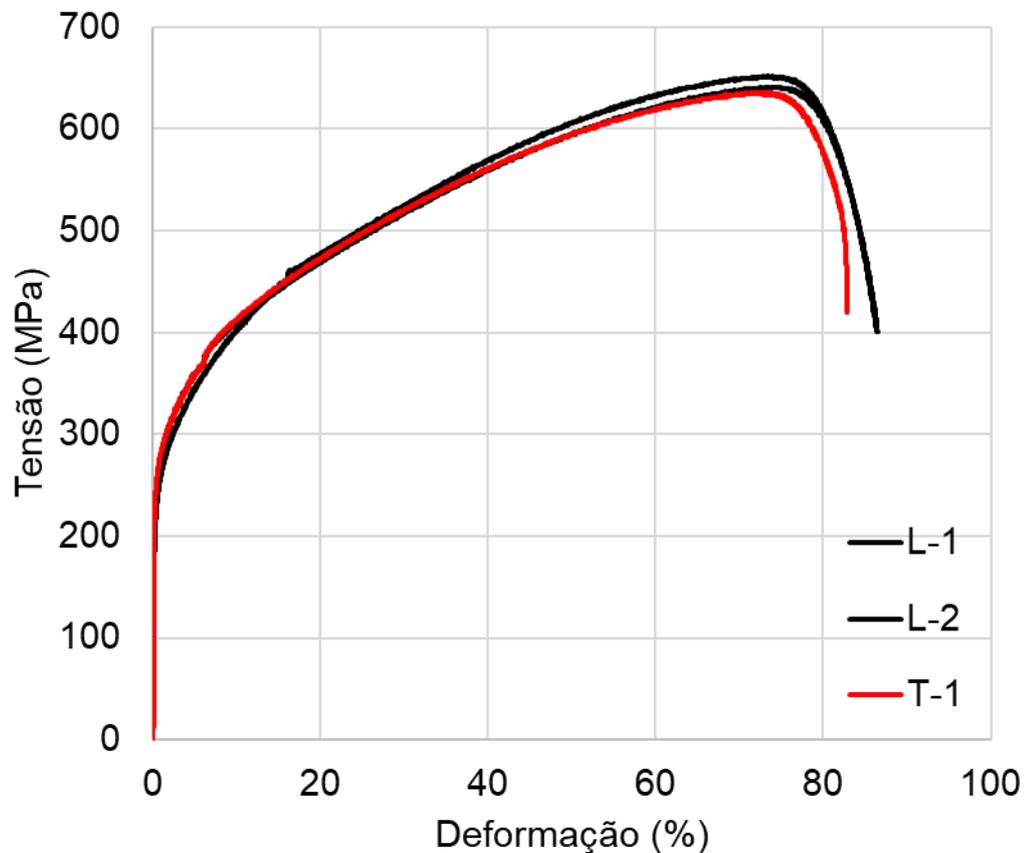


Figura 3.2 – Curva Tensão x Deformação do ensaio de tração.

### 3.2 Fabricação dos corpos de prova

As dimensões dos CPs foram baseadas no proposto na norma ASTM E3205 (ASTM, 2020), sendo em formato de disco com 8 mm de diâmetro e 0,500 mm de espessura. Entretanto, os corpos de prova SPT utilizados são CPs modificados, como ilustrado na 3.3, pela presença de um entalhe lateral de comprimentos ( $a$ ) de 3,0 mm, 3,3 mm, 3,5 mm, 3,8 mm, 4,2 mm e 4,5 mm. Para a fabricação, utilizando uma máquina de eletroerosão a fio, foram usinadas 12 barras cilíndricas com 8 mm de diâmetro, sendo 6 barras na direção T e 6 barras na direção L. Para cada conjunto de barras definidos pela direção, foram usinados os diferentes comprimentos de entalhe lateral na direção radial com largura de 0,2 mm (diâmetro do fio da eletroerosão). Os corpos de prova denominados LT foram usinados a partir das barras L com entalhe na direção T, já os CPs denominados TL foram usinados a partir das barras T e possuem o entalhe na direção L. Em seguida, as barras foram cortadas em discos de aproximadamente 0,650 mm de espessura via eletroerosão a fio. Por fim, os discos foram lixados progressivamente com lixas abrasivas de SiC de 400, 600 e 1200 *mesh* para obtenção de corpos de prova com a espessura indicada pela norma ( $0,500 \pm 0,005$  mm).

A espessura dos corpos de prova foi medida utilizando um micrômetro digital para medições externas, com resolução de 0,001 mm. O comprimento do entalhe foi medido utilizando um projetor de perfil da marca Mitutoyo, série PJ-A3000. A medição foi realizada utilizando o cabeçote do eixo Y, com resolução de 0,001 mm, como mostrado na Fig. 3.4. Durante a medição foi utilizada uma lente de aumento de 10X. Ambos os mensurandos foram medidos cinco vezes a temperatura ambiente de  $20 \pm 1$  °C.

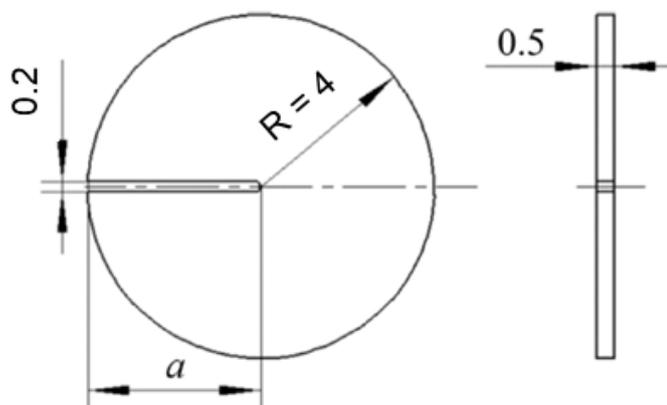


Figura 3.3 – Geometria do corpo de prova entalhado (ALMEIDA et al., 2023).



Figura 3.4 – Projetor de Perfil para medição do comprimento do entalhe.

A temperatura ambiente foi monitorada com um termo-higrômetro digital com resolução de 0,1 °C e faixa nominal de -20 a 60 °C. Os certificados de calibração do micrômetro, do projetor de perfil e do termo-higrômetro se encontram nos anexos A, B e C, respectivamente.

Os resultados da verificação dimensional dos corpos de prova *Small Punch* são apresentados no APÊNDICE A.

### 3.3 Ensaio de puncionamento esférico

Os ensaios SPT foram conduzidos em um equipamento de puncionamento esférico instrumentado, como exibido na Fig. 3.5. Neste equipamento, uma esfera de metal duro (WC-Co) com um diâmetro de 2,5 mm é deslocada por uma haste metálica conectada a uma célula de carga da marca HBM, modelo U2B, com faixa nominal de 5,0 kN, que mede a força aplicada durante o ensaio. O deslocamento é medido utilizando dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) da marca HBM, série WI, com faixa nominal de 5 mm. Os dados obtidos são armazenados por meio de um programa de controle desenvolvido em LabVIEW.

O equipamento possui uma matriz superior e uma matriz inferior, ambas de aço 4340 revenido a 280 °C, uma base de suporte e outros componentes de fixação e acoplamento, mostrados na Fig. 3.6.

Para o ensaio SPT com corpos de prova entalhados é crucial a centralização do CP em relação a matriz inferior e o atuador. Para isso, foi utilizado o dispositivo de posicionamento mostrado na Fig. 3.7a que garante que a esfera irá puncionar o CP na linha do entalhe. Além disso, este dispositivo garante repetibilidade ao assegurar que o atuador na mesma distância da raiz do entalhe. A montagem do corpo de prova no dispositivo de posicionamento é mostrada na Fig. 3.7b.

A montagem do conjunto consiste em acoplar a matriz inferior na base de suporte, encaixar o dispositivo de posicionamento, acomodar o CP no furo do dispositivo de posicionamento, acoplar a matriz superior, fixar o conjunto com a porca de fixação e, inserir a esfera. Por fim, o conjunto é colocado na base do equipamento de puncionamento esférico instrumentado e a haste metálica (atuador) é encaixada no furo da matriz superior.

O ensaio SPT inicia-se com o avanço rápido do atuador em relação ao CP, até que os LVDTs toquem a superfície de referência. Em seguida, a velocidade de avanço é reduzida para 0,02 mm/s e mantida até o fim do ensaio. O programa de controle inicia o armazenamento dos dados de força e deslocamento quando a célula de carga mede uma força de 30 N. O ensaio termina quando a força medida cai um valor determinado pelo operador, a depender do comprimento do entalhe do CP ensaiado, em relação a força máxima. Os dados obtidos são utilizados para plotar a curva de resposta de força x deslocamento.

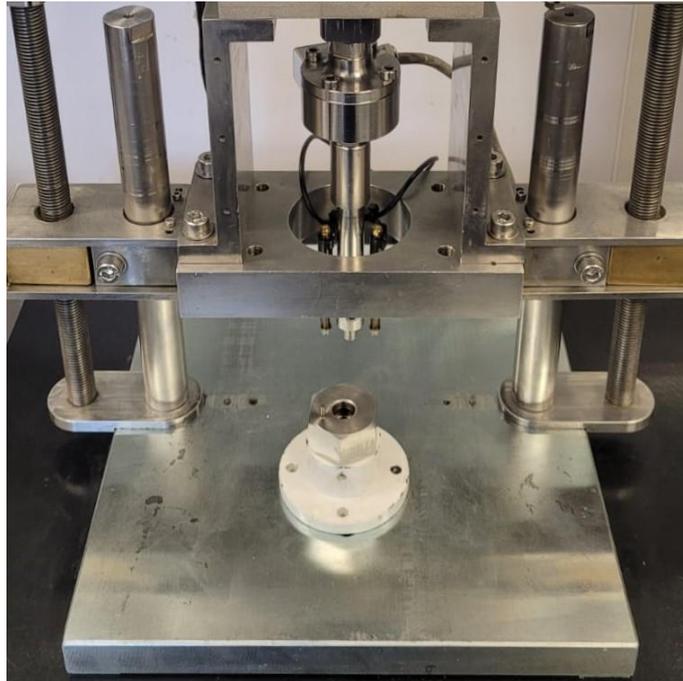


Figura 3.5 – Equipamento de Puncionamento Esférico Instrumentado.

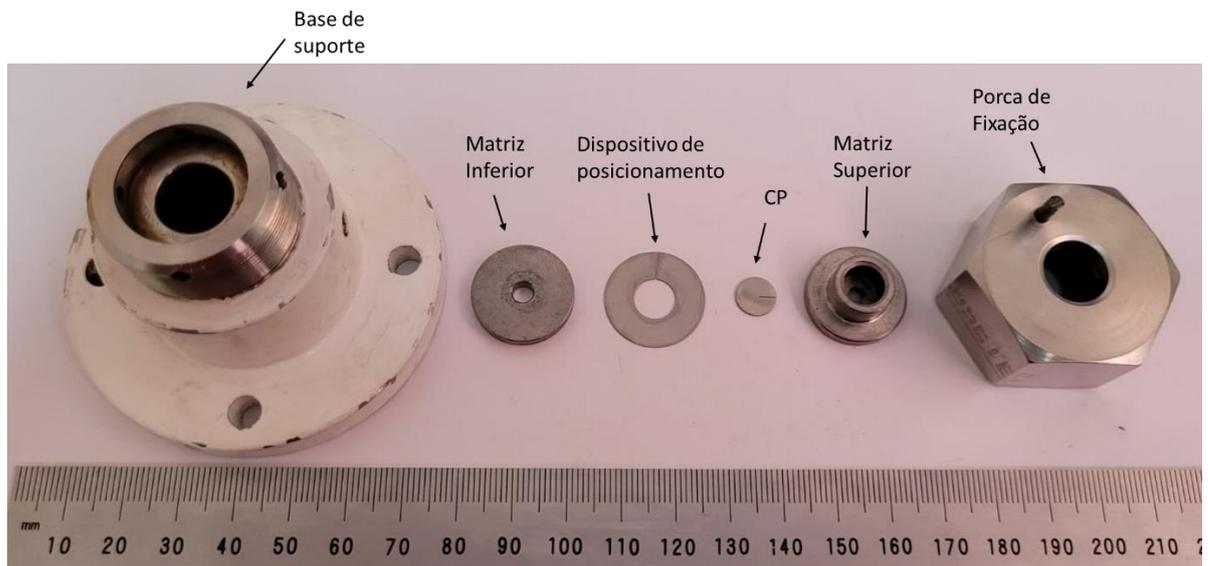


Figura 3.6 – Componentes do dispositivo para ensaio SPT.

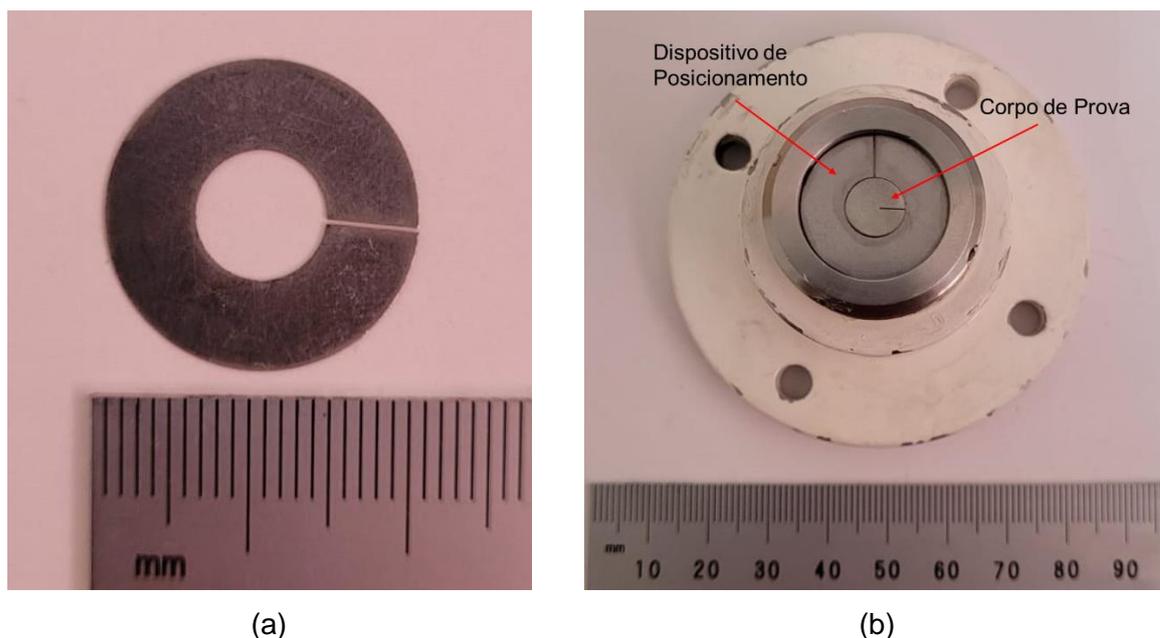


Figura 3.7 – (a) Dispositivo de posicionamento do CP; (b) CP posicionado.

### 3.4 Avaliação da tenacidade à fratura

No presente trabalho foi aplicada a metodologia proposta por Lacalle, Álvarez e Gutiérrez-Solana (2008) e o método da Taxa de Alívio de Energia proposto por Alegre, Cuesta e Barbachano (2014) para avaliar a tenacidade à fratura do aço inoxidável AISI 304. Estas metodologias foram adotadas devido aos bons resultados obtidos para outros aços. Além disso, o corpo de prova entalhado possibilita que ambas as metodologias sejam analisadas utilizando o mesmo conjunto de ensaios.

#### 3.4.1 Método Lacalle

Em suma, o Método Lacalle propõe que a energia necessária para uma trinca de comprimento  $a_1$  propagar para uma trinca de comprimento  $a_2$  é a área abaixo da curva  $a_1$  até o ponto de interseção com o prolongamento da força máxima da curva  $a_2$ , como mostra a Fig. 3.8. A tenacidade à fratura do material pode ser determinada a partir da construção da curva J-R utilizando as Equações (2.9) e (2.10).

Para o equipamento de puncionamento esférico utilizado e as dimensões do corpo de prova ensaiado, tem-se que o ligamento remanescente  $b$  da Equação (2.9) é o diâmetro do CP (8 mm) menos o comprimento do entalhe ( $a$ ), e a região de influência do aperto das matrizes  $d$  da Equação (2.10) é de 2 mm. Portanto, as equações utilizadas para determinar a tenacidade à fratura são as Eq. (3.1) e (3.2)

$$J = \frac{C \cdot U}{B \cdot (8 - a)} \quad (3.1)$$

$$C = 0,12 + \frac{58 \cdot (a - 2)}{\sigma_Y} \quad (3.2)$$

A tensão de escoamento ( $\sigma_Y$ ) definida como a média entre os limites de escoamento e de resistência a tração para a direção longitudinal é de 435,6 MPa e para a direção transversal é de 439,3 MPa. O valor de  $\Delta a$  é obtido a partir da diferença dos comprimentos de entalhe  $\Delta a = a_2 - a_1$ . Realizando múltiplos ensaios com diferentes comprimentos de entalhes, obtêm-se diferentes pares de valores de J e de  $\Delta a$  e, então, é construído a curva J-R do material ASTM E1820 (ASTM, 2023) e calcula-se o valor de  $J_Q$  (valor de J para o offset de 0,2 mm de crescimento de trinca) para avaliar a tenacidade à fratura do material. O fluxograma da Fig. 3.9 descreve o procedimento para determinar a tenacidade à fratura utilizando o Método Lacalle.

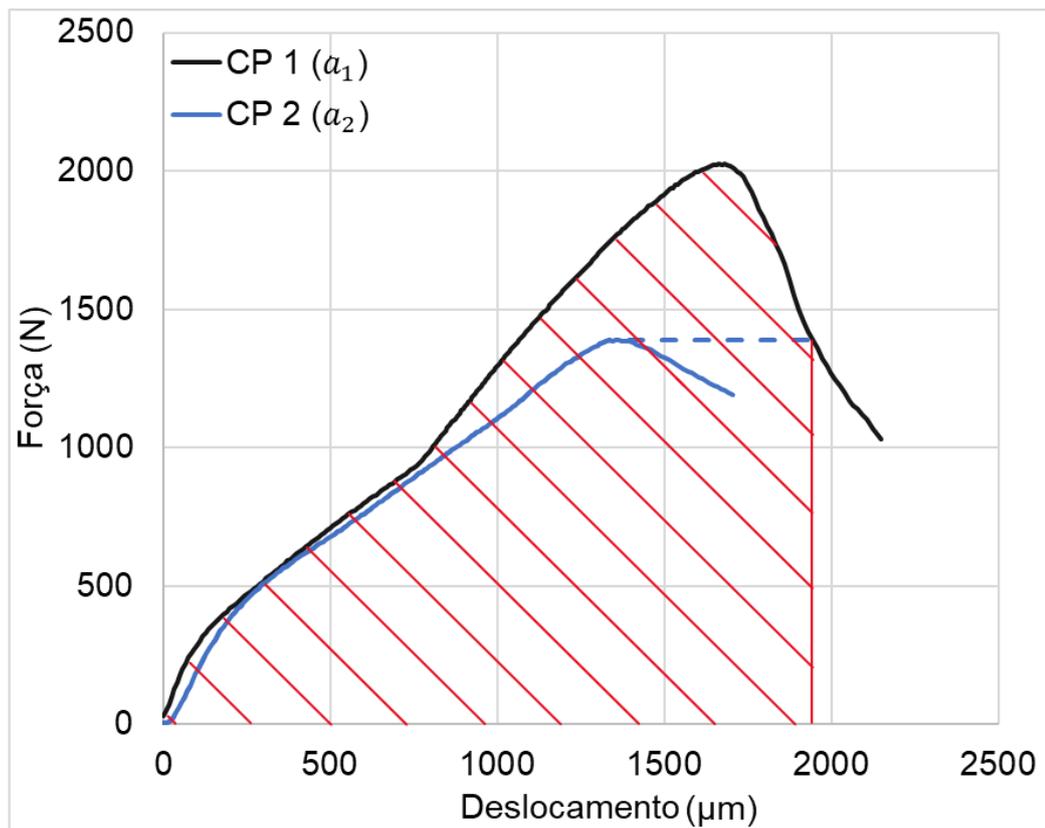


Figura 3.8 – Área abaixo da curva que representa a energia necessária para a trinca crescer de  $a_1$  para  $a_2$  (ALMEIDA et al., 2023).

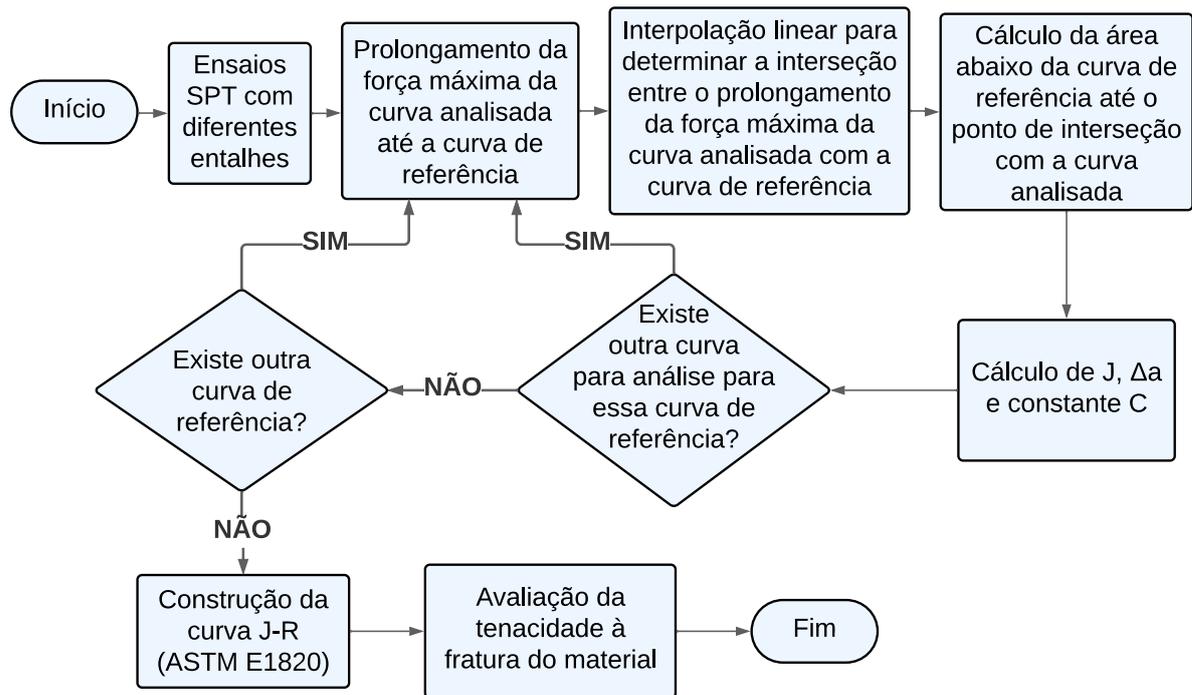


Figura 3.9 – Fluxograma do Método Lacalle.

### 3.4.2 Método da Taxa de Alívio de Energia

O Método da Taxa de Alívio de Energia ( $G$ ) consiste em determinar a energia necessária para uma trinca de comprimento  $a_1$  crescer até  $a_2$  a partir da diferença de energia armazenada (área abaixo da curva) de cada CP entalhado, como mostrado na Fig. 2.9.

Neste método, a Taxa de Alívio de Energia é calculada via Eq. (3.3). Considerando que a Integral-J é uma generalização da Taxa de Alívio de Energia, pode-se considerar que  $G = J$  e que o valor de  $J$  em que há o início de propagação de trinca estável ( $J_{IC}$ ) ocorre no ponto de força máxima.

$$G = -\frac{1}{t} \left( \frac{U_2 - U_1}{a_2 - a_1} \right) \quad (3.3)$$

O valor de  $G$  pode ser obtido utilizando apenas dois CP com diferentes comprimentos de entalhe, não sendo necessário o ensaio de diversos CP. Porém ainda não há um consenso de qual par de comprimento de entalhe fornece o melhor resultado e há uma grande dispersão a depender do par de comprimento de entalhe utilizado. Além disso, este método só obteve bons resultados quando comparado aos resultados obtidos via ensaios convencionais de

tenacidade em estado plano de tensões, o qual não define a propriedade de tenacidade à fratura ( $J_{IC}$ ) para todas as condições, mas apenas para condições de similitude de espessura.

A Figura 3.10 exibe o fluxograma para avaliar a tenacidade à fratura utilizando o método da Taxa de Alívio de Energia.

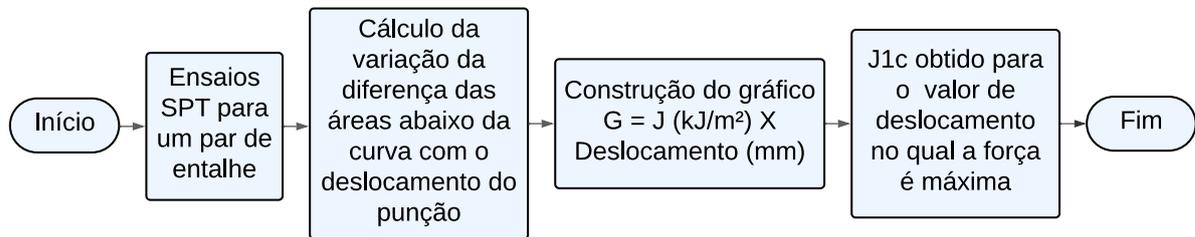


Figura 3.10 – Fluxograma do Método da Taxa de Alívio de Energia.

### 3.5 Software para processamento de dados e análise de resultados

Brito (2022) desenvolveu um *software* em código aberto utilizando a linguagem de programação Python para obter os resultados de força máxima, deslocamento máximo, limites de escoamento e de resistência a partir de ensaios SPT. Nesse trabalho foram implementados ao *software* os métodos Lacalle e da Taxa de Alívio de Energia utilizados para determinar a tenacidade à fratura. Para tanto, seguiu-se os procedimentos descritos nos fluxogramas das Fig. 3.9 e 3.10.

O *software* foi desenvolvido com o objetivo de facilitar o processo de análise de dados pois as metodologias utilizadas necessitam de vários cálculos de áreas de valores discretizados e da realização de interpolações lineares. Além disso, o *software* permite a visualização e o armazenamento dos resultados de forma simples e rápida. As Figuras 3.11 e 3.12 exibem a *Graphical User Interface* (GUI) do *software* desenvolvido.

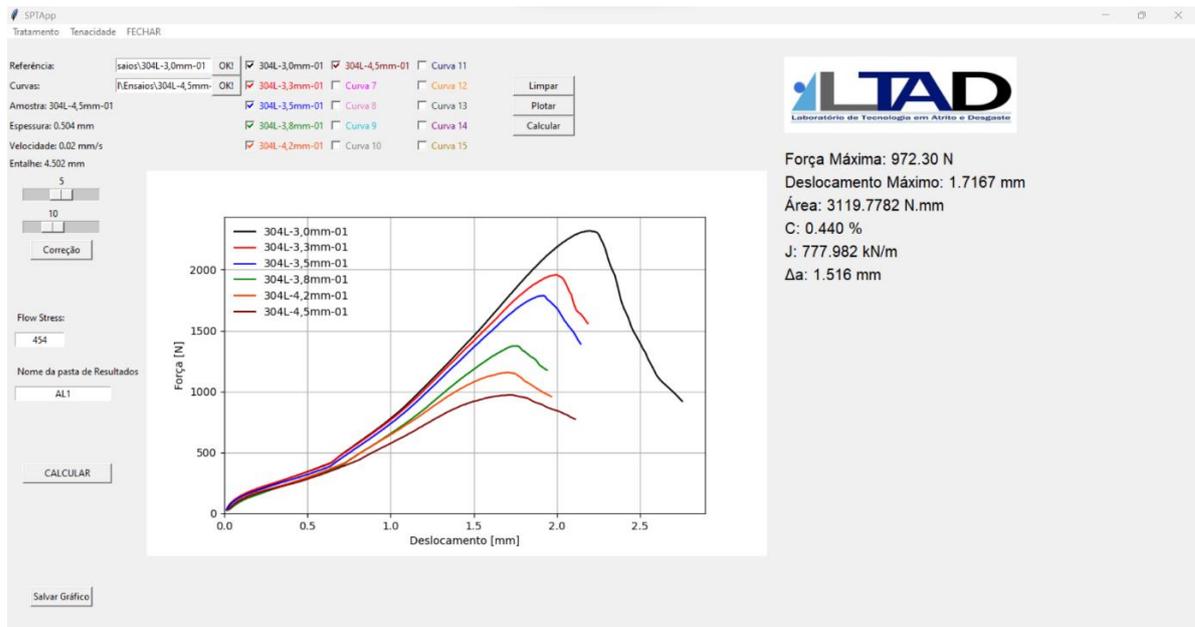


Figura 3.11 – Interface do *software* de análise de dados para o método Lacalle.

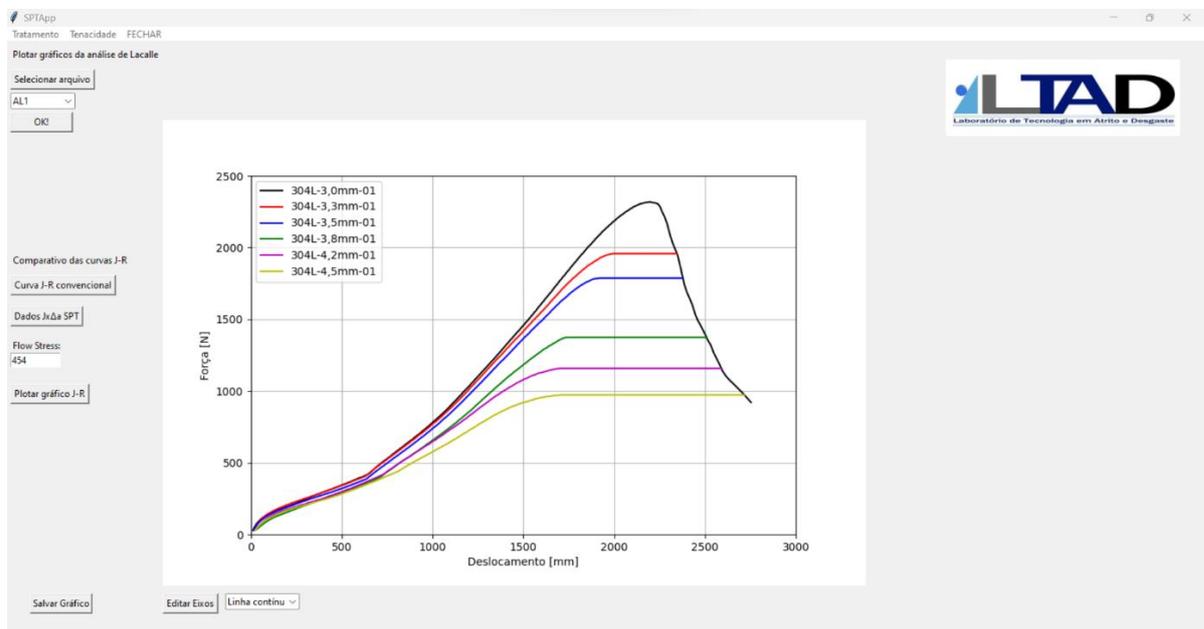


Figura 3.12 – Visualização do prolongamento das curvas analisadas no *software* desenvolvido.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos ensaios SPT, as análises dos resultados por meio dos métodos Lacalle e da Taxa de Alívio de Energia, bem como as discussões decorrentes.

#### **4.1 Resultados dos ensaios SPT**

As curvas de resposta dos ensaios SPT para as direções longitudinal e transversal são apresentados nas Fig. 4.1 e 4.2, respectivamente. Vale mencionar que os resultados para a direção transversal apresentam apenas duas curvas de resposta para cada comprimento de entalhe devido ao fato que a haste metálica (Fig. 2.4) utilizada inicialmente possui comprimento de 2 mm, o que limita a deformação do corpo de prova em no máximo 2 mm. O aço AISI 304 apresenta grandes deformações até a ruptura, sendo assim, foi necessário utilizar outra haste metálica com comprimento de 3 mm para que este material fosse ensaiado. Como a haste nunca havia sido utilizada foi necessário ensaiar alguns corpos de prova até que houvesse uma deformação inicial na ponta da haste para que os resultados estabilizassem e a dispersão fosse a esperada para os resultados do ensaio.

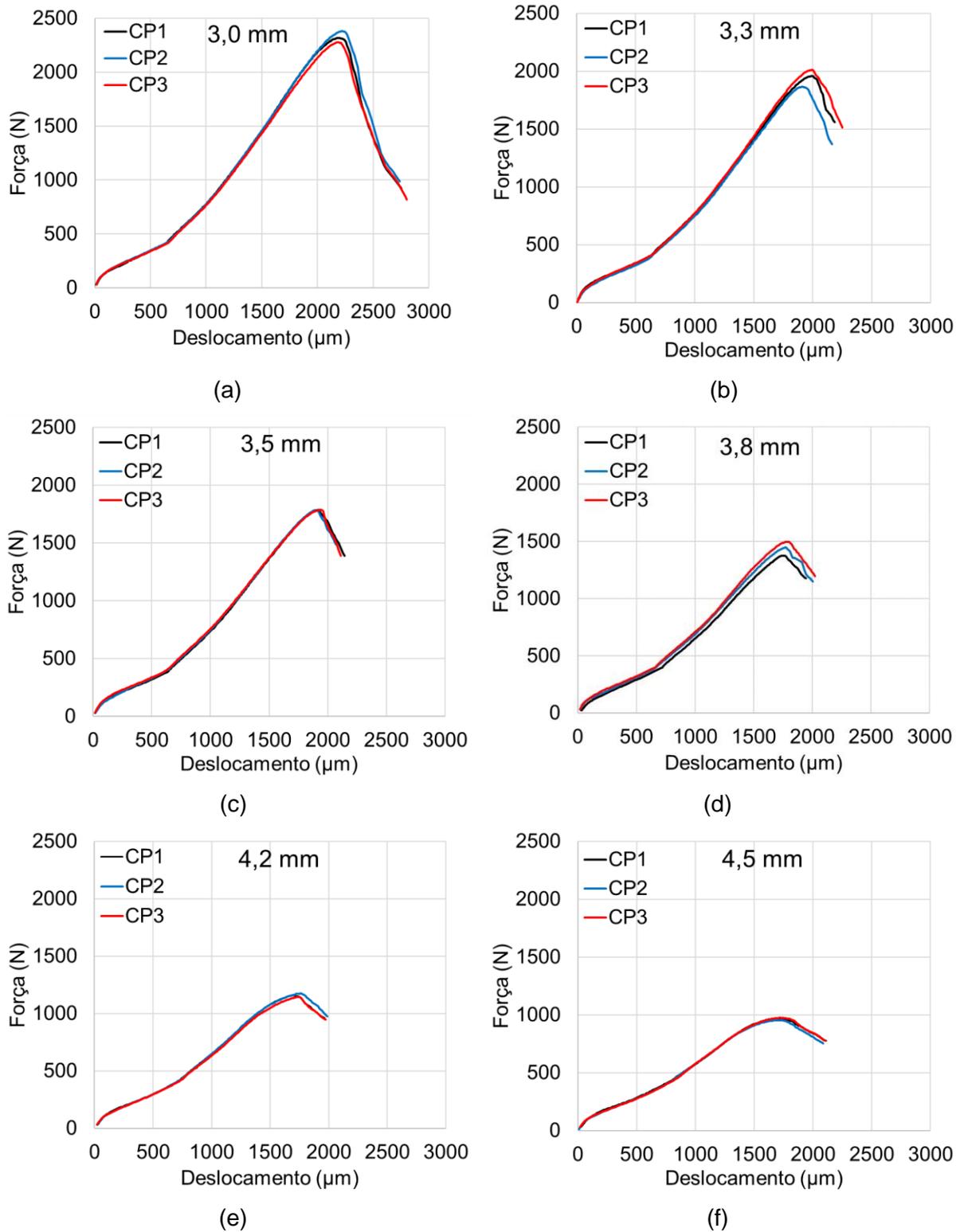
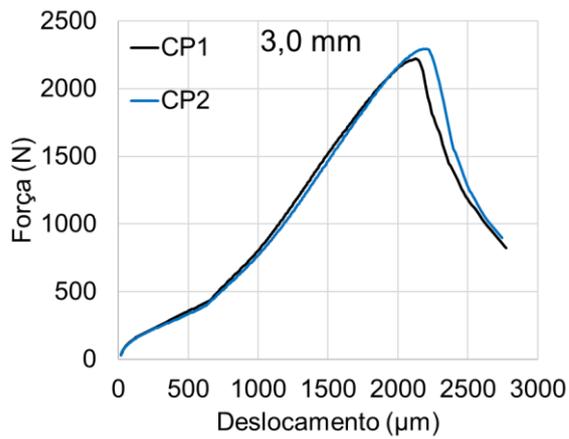
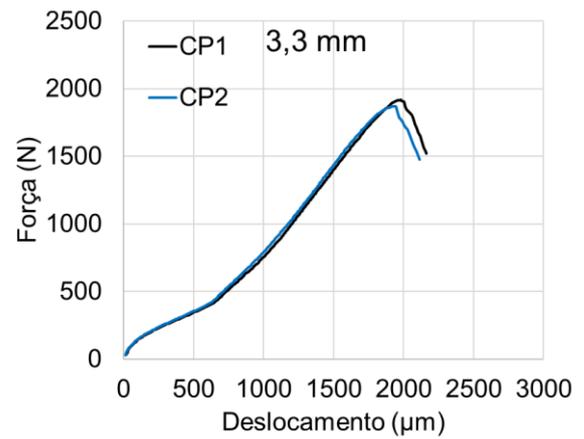


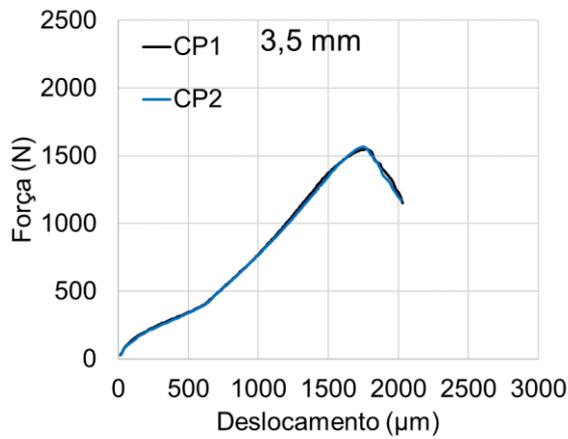
Figura 4.1 - Curvas de resposta SPT na direção longitudinal para os entalhes: (a) 3,0 mm; (b) 3,3 mm; (c) 3,5 mm; (d) 3,8 mm; (e) 4,2 mm e (f) 4,5 mm.



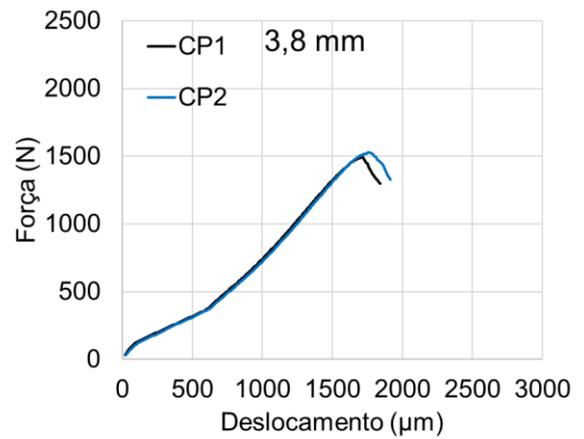
(a)



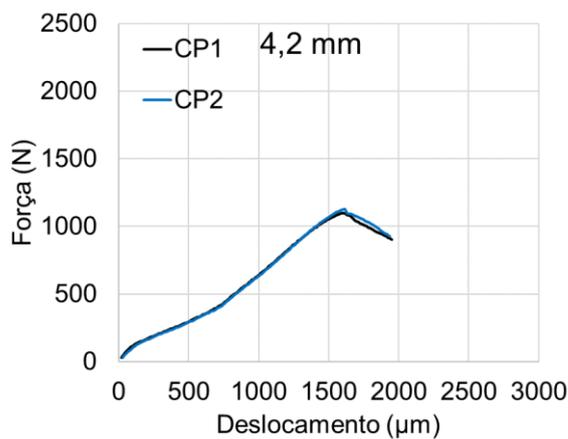
(b)



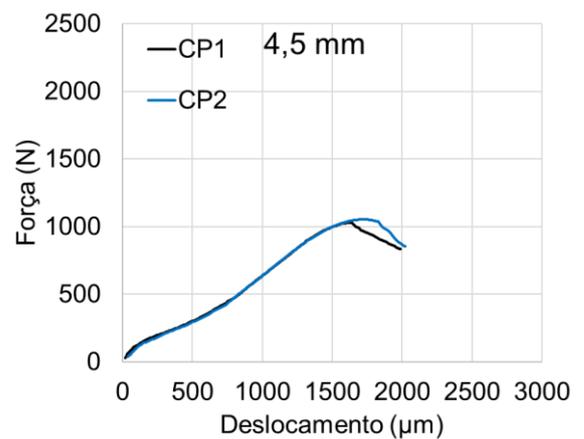
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.2 - Curva de resposta SPT na direção Transversal para os entalhes: (a) 3,0 mm; (b) 3,3 mm; (c) 3,5 mm; (d) 3,8 mm; (e) 4,2 mm e (f) 4,5 mm.

## 4.2 Resultados Método Lacalle

O método Lacalle permite que mais de uma análise seja feita utilizando o mesmo CP de referência (entalhe de 3,0 mm). Assim, para um CP de referência e réplicas dos ensaios dos demais comprimentos de entalhe é possível realizar o procedimento do método três vezes, obtendo 5 pontos da curva J-R para cada análise. Para melhor leitura do texto do trabalho, será apresentado no corpo do texto apenas uma das análises e o resultado do método para determinar a tenacidade à fratura do material, as demais figuras das análises serão apresentadas em apêndices.

### 4.2.1 Direção Longitudinal

A Figura 4.3 mostra o conjunto de curvas de resposta do ensaio SPT do AISI 304 na direção longitudinal para diferentes comprimentos de entalhe dos corpos de prova de numeração 1 (CP1). Estas são processadas utilizando o método Lacalle para obter as curvas da Fig. 4.4 para o cálculo da energia associada ao crescimento da trinca.

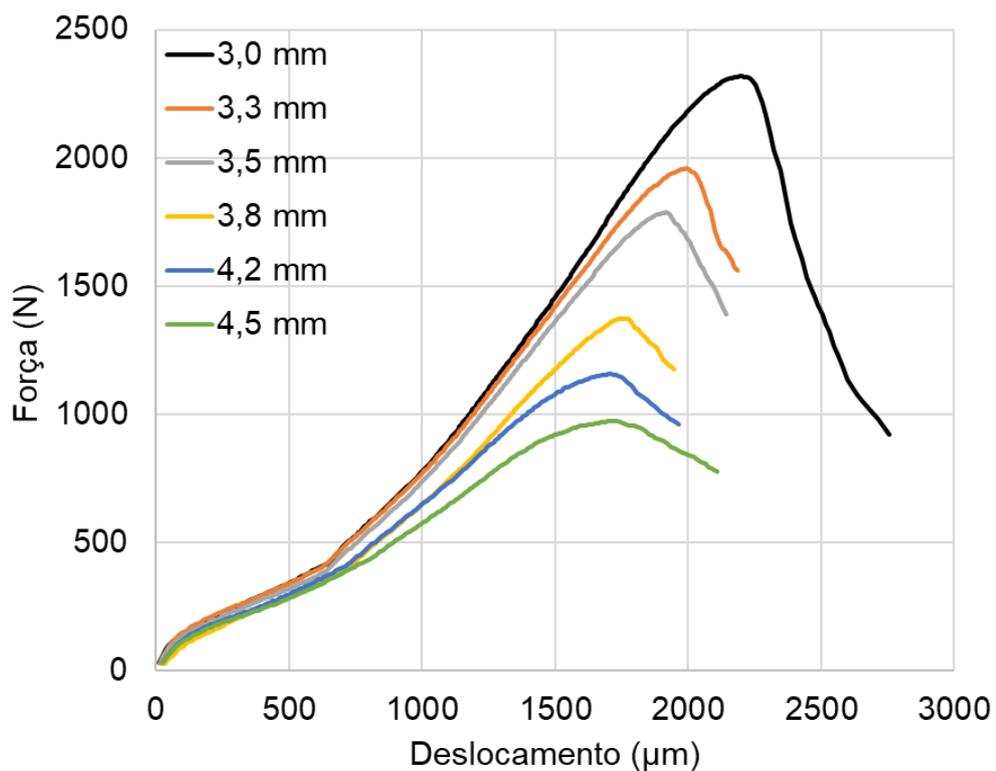


Figura 4.3 – Curvas SPT originais para diferentes comprimentos de entalhe da direção longitudinal.

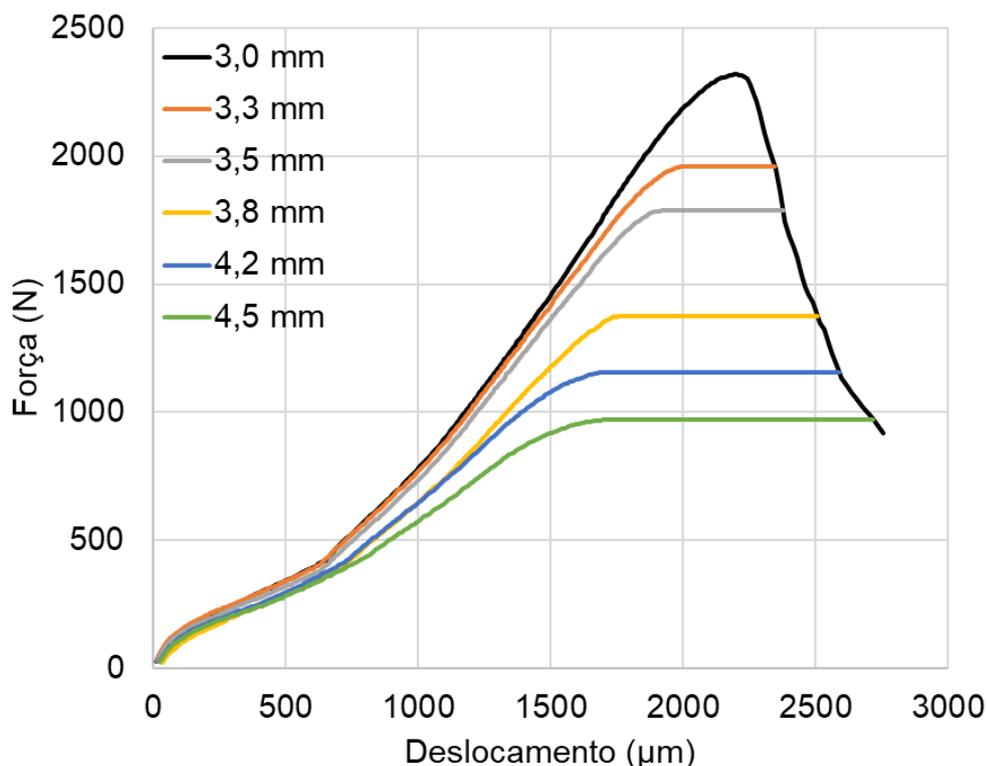


Figura 4.4 – Curvas SPT processadas pelo método Lacalle da direção longitudinal.

Este tratamento das curvas também foi realizado mantendo como referência o CP1 (3,0 mm) mas utilizando os CP2 e CP3 (dos demais entalhes), bem como utilizando os CP1 e CP2 (3,0 mm) como referência e os CPs 1, 2 e 3 dos demais entalhes. Os gráficos destas curvas são apresentados no APÊNDICE B. É importante mencionar que durante o ensaio do CP2 de 3,0 mm o critério de parada do ensaio por redução de força não atingiu um patamar suficiente para que fosse possível utilizar os CP com entalhe de 4,5 mm em suas análises, pois estes apresentaram força máxima inferior ao mínimo da curva do CP2 de 3,0 mm.

Em seguida, foram realizados os cálculos das Eq. (3.1) e (3.2) para obter os pares  $J$  e  $\Delta a$  expostos nas Tab. 4.1, 4.2 e 4.3 relativos a cada corpo de prova de referência. Nestas tabelas são apresentados também a média e o desvio padrão (s) para nível de confiança de 68,27 %.

Para cada tabela de resultado, foi construída a curva J-R do material utilizando o procedimento da norma ASTM E1820 (ASTM, 2023). A Figura 4.5 exibe a curva J-R construída a partir do CP1 de entalhe de 3,0 mm como referência. As demais curvas J-R individuais para cada CP de referência são exibidas no APÊNDICE C. A Figura 4.6 apresenta as três curvas J-R construídas usando os três CPs de referência para o aço AISI 304 na direção longitudinal.

Tabela 4.1 – Pares J- $\Delta a$  utilizando o CP1 como referência da direção longitudinal.

CP1	3,3 mm		3,5 mm		3,8 mm		4,2 mm		4,5 mm	
	J (kJ/m <sup>2</sup> )	$\Delta a$ (mm)								
	310,9	0,277	364,3	0,471	487,6	0,793	636,1	1,190	802,5	1,514
	313,2	0,267	367,1	0,486	475,6	0,789	636,6	1,193	806,5	1,511
	307,8	0,280	366,8	0,480	472,7	0,794	639,2	1,185	802,4	1,512
<b>Média</b>	310,6	0,275	366,1	0,479	478,6	0,792	637,3	1,189	803,8	1,512
<b>s</b>	2,7	0,007	1,6	0,008	7,9	0,003	1,6	0,004	2,3	0,002

Tabela 4.2 - Pares J- $\Delta a$  utilizando o CP2 como referência da direção longitudinal.

CP2	3,3 mm		3,5 mm		3,8 mm		4,2 mm		4,5 mm	
	J (kJ/m <sup>2</sup> )	$\Delta a$ (mm)								
	322,1	0,290	376,2	0,484	501,9	0,806	654,2	1,203	-	-
	323,6	0,280	379,3	0,499	492,0	0,802	653,8	1,206	-	-
	320,7	0,293	378,8	0,493	490,4	0,807	658,1	1,198	-	-
<b>Média</b>	322,1	0,288	378,1	0,492	494,8	0,805	655,3	1,202	-	-
<b>s</b>	1,4	0,007	1,7	0,008	6,2	0,003	2,3	0,004	-	-

Tabela 4.3 - Pares J- $\Delta a$  utilizando o CP3 como referência da direção longitudinal.

CP3	3,3 mm		3,5 mm		3,8 mm		4,2 mm		4,5 mm	
	J (kJ/m <sup>2</sup> )	$\Delta a$ (mm)								
	298,4	0,282	353,8	0,476	477,7	0,798	626,3	1,195	789,2	1,519
	302,0	0,272	356,8	0,491	467,1	0,794	626,8	1,198	792,4	1,516
	296,0	0,285	356,3	0,485	464,7	0,799	629,3	1,190	789,3	1,517
<b>Média</b>	298,8	0,280	355,7	0,484	469,8	0,797	627,5	1,194	790,3	1,517
<b>s</b>	3,0	0,007	1,6	0,008	7,0	0,003	1,6	0,004	1,8	0,002

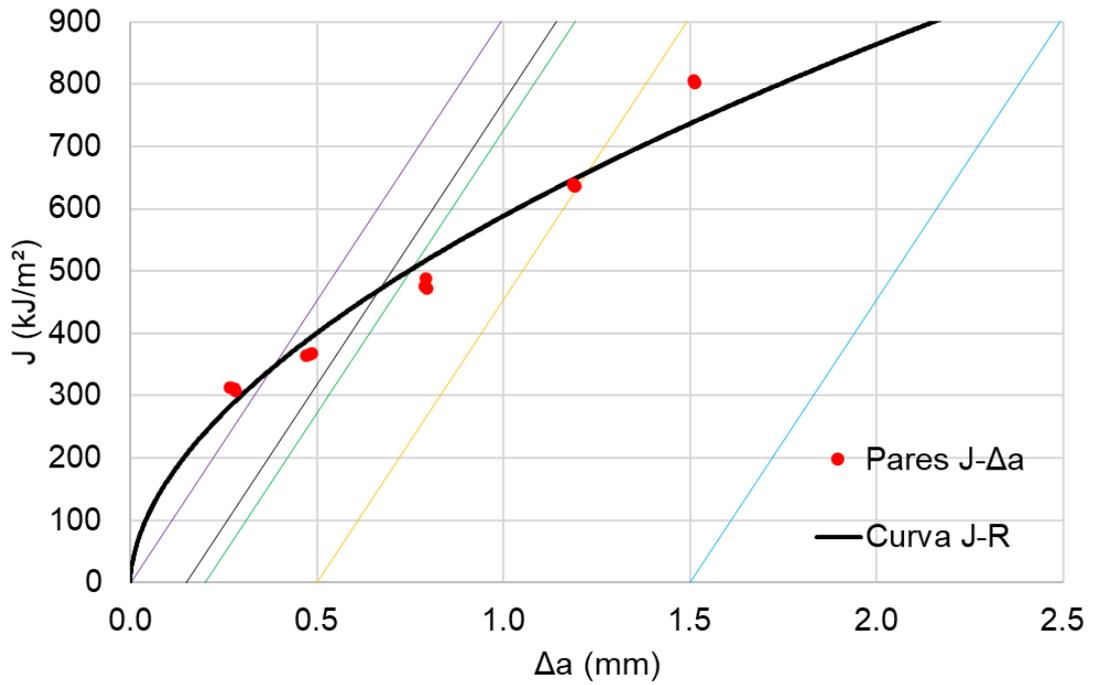


Figura 4.5 – Curva J-R utilizando o CP1 como referência da direção longitudinal.

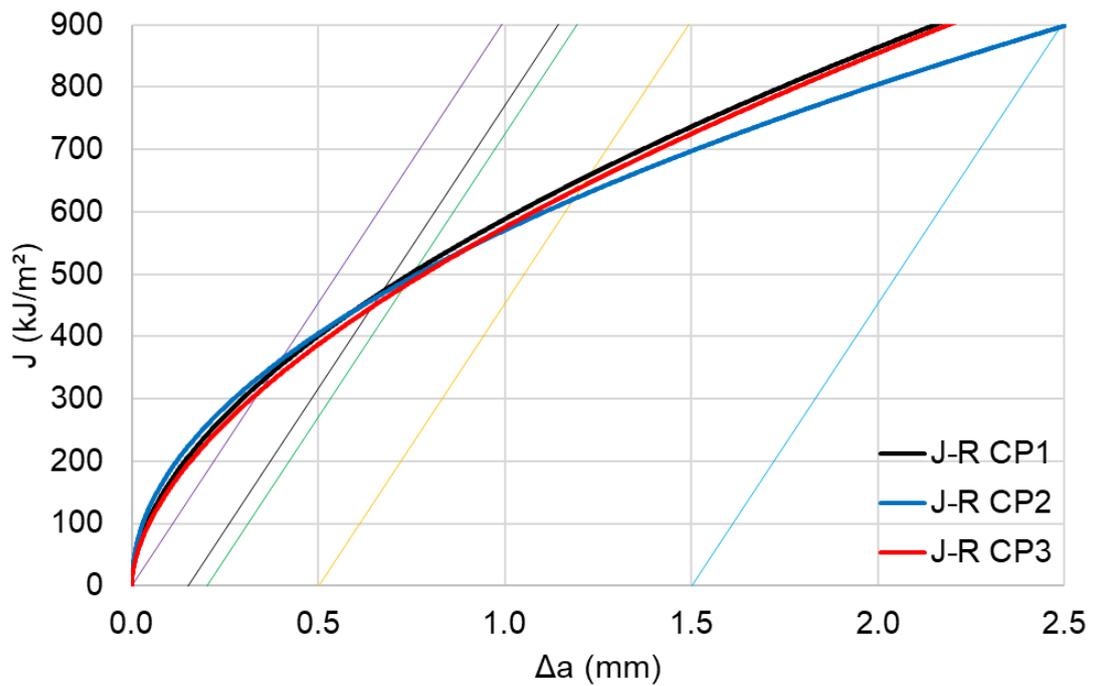


Figura 4.6 – Curvas J-R obtidas via método Lacalle para a direção longitudinal do aço AISI 304.

Em seguida, foi calculado o valor de  $J_Q$  para cada curva e os resultados são apresentados na Tab. 4.4. Dos resultados obtidos é evidente que a curva J-R para o CP2 teve inclinação inicial menor em comparação com as demais. Esse fenômeno decorreu da impossibilidade de utilizar os corpos de prova com entalhe de 4,5 mm na análise. Além disso, era esperado que o resultado de  $J_Q$  para a J-R que usou o CP2 como referência fosse o maior, pois este apresenta a maior área total abaixo da curva. Entretanto, devido ao problema previamente mencionado, essa expectativa não se concretizou.

Tabela 4.4 – Resultados de  $J_Q$  para a direção longitudinal do AISI 304.

<b>Referência</b>	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>Média</b>	<b>s</b>
<b><math>J_Q</math> (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	503,3	492,2	480,1	491,9	11,5

#### 4.2.2 Direção Transversal

A Figura 4.7 exibe o conjunto de curvas de resposta do ensaio SPT do AISI 304 na direção transversal para diferentes comprimentos de entalhe dos corpos de prova CP1, as quais são processadas utilizando o método Lacalle e obtêm-se as curvas da Fig. 4.8 para o cálculo da energia associada ao crescimento da trinca. Os gráficos das demais curvas para a direção transversal são expostas no APÊNDICE D. Pode-se notar que para a direção transversal as curvas de respostas dos entalhes de 3,5 mm e 3,8 mm foram mais próximas do que aqueles obtidos para a direção longitudinal, que ficaram em patamares de força máxima e deslocamento máximo distintos. Enquanto para a direção transversal a dispersão média entre estes comprimentos de entalhe foi de 58 N, para a direção longitudinal foi de 259 N. Este fato também ocorreu para os comprimentos de entalhe de 4,2 e 4,5 mm, com dispersão de 73 N para a direção transversal e 195 N para a direção longitudinal.

Os pares  $J$  e  $\Delta a$  para a direção transversal são expostos nas Tab. 4.5 e 4.6 relativo a cada corpo de prova de referência e suas respectivas curvas J-R são exibidas nas Fig. 4.9 e 4.10. Adicionalmente, a Figura 4.11 mostra ambas as curvas no mesmo gráfico.

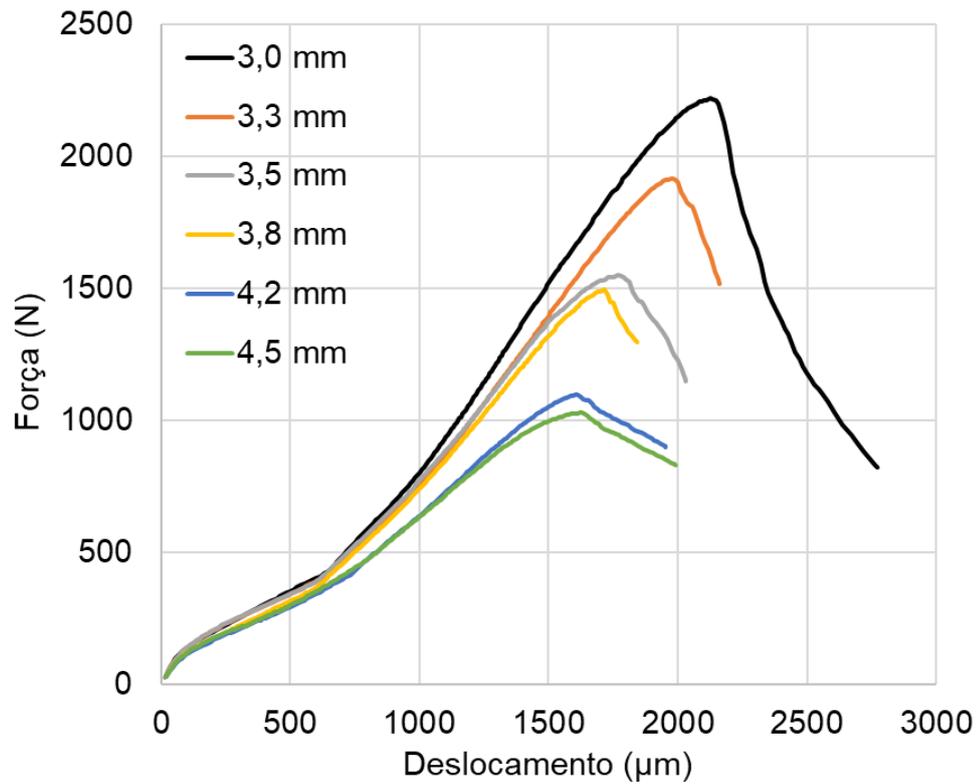


Figura 4.7 - Curvas SPT originais para diferentes comprimentos de entalhe da direção transversal.

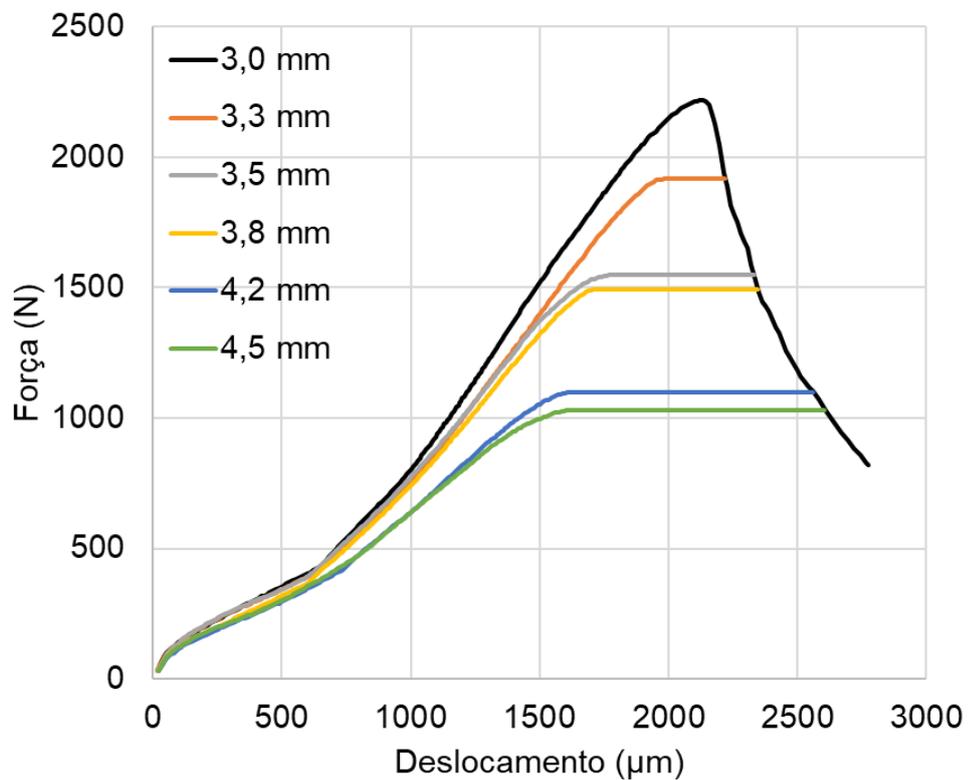


Figura 4.8 - Curvas SPT processadas pelo método Lacalle da direção transversal.

Tabela 4.5 - Pares J- $\Delta a$  utilizando o CP1 como referência da direção transversal.

CP1	3,3 mm		3,5 mm		3,8 mm		4,2 mm		4,5 mm	
	J (kJ/m <sup>2</sup> )	$\Delta a$ (mm)								
	274,1	0,299	345,1	0,495	419,1	0,786	593,4	1,202	706,4	1,475
	277,9	0,292	341,6	0,490	412,3	0,779	590,7	1,196	704,9	1,481
<b>Média</b>	276,0	0,296	343,4	0,492	415,7	0,783	592,1	1,199	705,7	1,478
<b>s</b>	2,6	0,005	2,5	0,003	4,8	0,005	1,9	0,004	1,0	0,004

Tabela 4.6 - Pares J- $\Delta a$  utilizando o CP2 como referência da direção transversal.

CP2	3,3 mm		3,5 mm		3,8 mm		4,2 mm		4,5 mm	
	J (kJ/m <sup>2</sup> )	$\Delta a$ (mm)								
	296,9	0,292	362,3	0,488	441,1	0,779	609,4	1,195	724,7	1,468
	300,1	0,285	358,5	0,483	433,7	0,772	608,7	1,189	722,9	1,474
<b>Média</b>	298,5	0,289	360,4	0,485	437,4	0,776	609,1	1,192	723,8	1,471
<b>s</b>	2,2	0,005	2,7	0,003	5,2	0,005	0,5	0,004	1,3	0,004

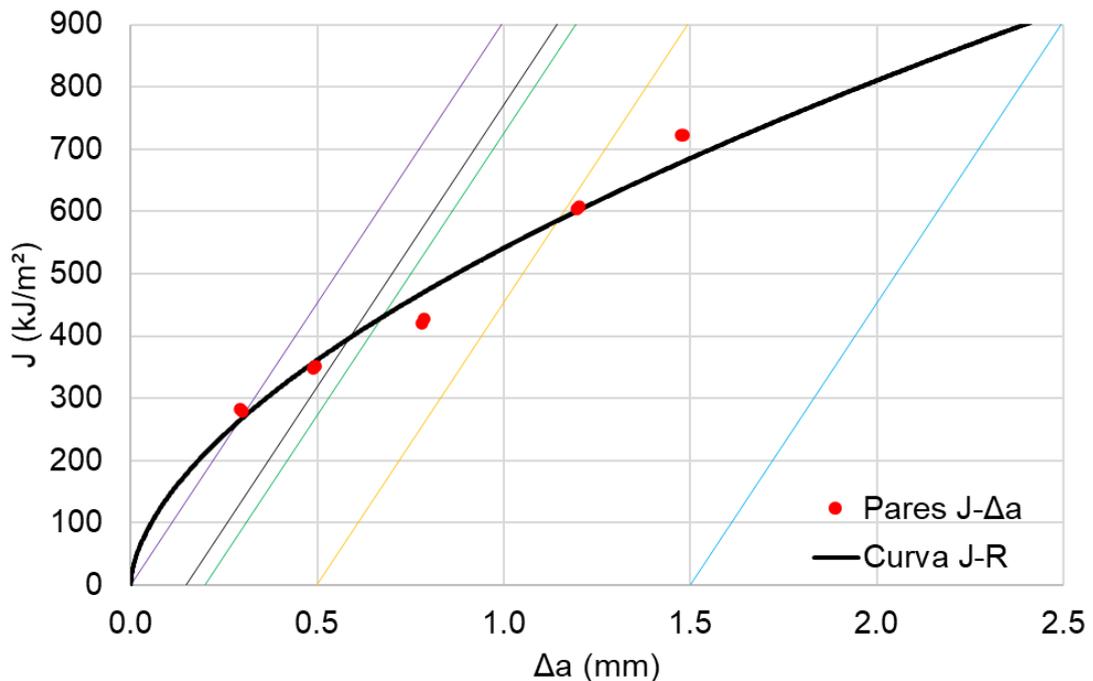


Figura 4.9 - Curva J-R utilizando o CP1 como referência da direção transversal.

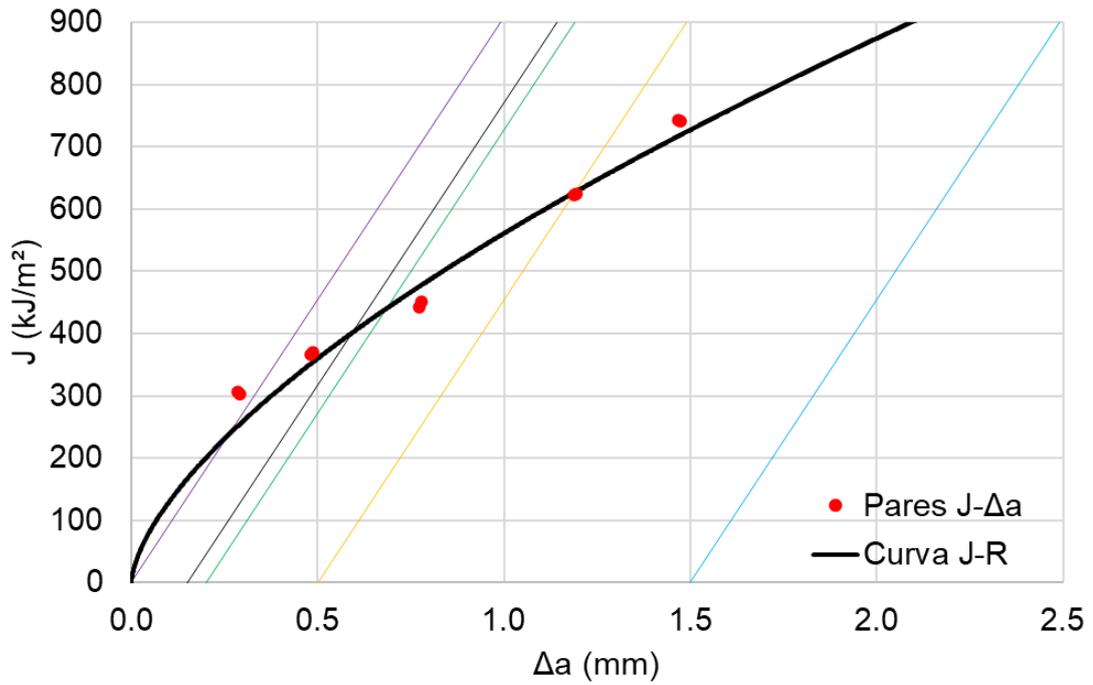


Figura 4.10 – Curva J-R utilizando o CP2 como referência da direção transversal.

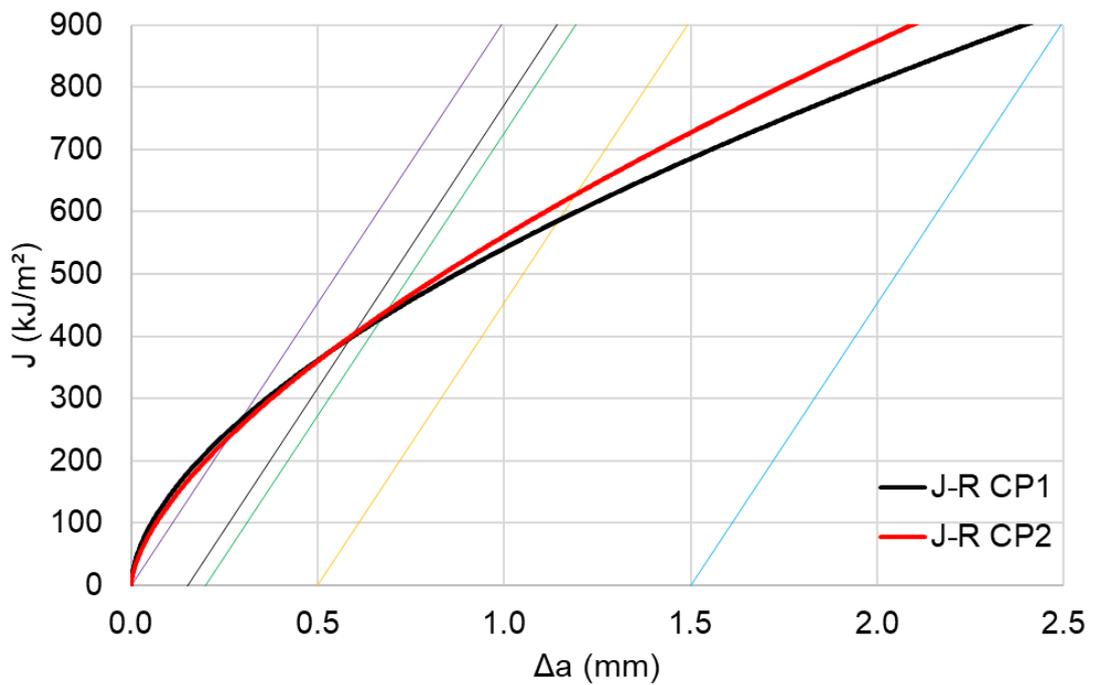


Figura 4.11 – Curvas J-R obtidas via método Lacalle para a direção transversal do aço AISI 304.

Como resultado, tem-se os valores  $J_Q$  descritos na Tab. 4.7. Comparando os resultados obtidos em ambas as direções do aço AISI 304, observa-se que o valor médio de  $J_Q$  para a

direção transversal é 56,4 kJ/m<sup>2</sup> menor do que o da direção longitudinal, representando uma redução de 11,5 %.

Tabela 4.7 – Resultados de  $J_Q$  para a direção transversal do AISI 304.

Referência	CP1	CP2	Média	s
$J_Q$ (kJ/m <sup>2</sup> )	430,3	440,6	435,5	7,3

### 4.3 Resultados do Método da Taxa de Alívio de Energia

Apesar de não haver um consenso de quais são os melhores comprimentos de entalhe para a análise do Método da Taxa de Alívio de Energia, Alegre et al. (2016) verificaram que para corpos de prova quadrados de 10 x 10 mm a faixa de comprimentos de entalhe que obtiveram os melhores resultados foram de 4,5 a 5,5 mm. Para o presente trabalho, a faixa de comprimento de entalhe equivalente seria a de 3,5 a 4,5 mm. Portanto, no corpo do texto será apresentado apenas os gráficos de comprimentos de entalhe de 3,8 mm a 4,5 mm e os demais gráficos são apresentados no APÊNDICE E para a direção longitudinal e no APÊNDICE F para a direção transversal.

#### 4.3.1 Direção Longitudinal

As Figuras 4.12 e 4.13 apresentam os gráficos da taxa de alívio de energia pelo deslocamento do punção para os comprimentos de entalhe de 3,8 mm a 4,2 mm e de 4,2 mm a 4,5 mm, respectivamente, para a direção longitudinal do aço AISI 304. Os resultados de  $J_C$  para os pares de entalhes analisados são apresentados na Tab. 4.8.

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que a dispersão é elevada o que compromete a repetibilidade e a qualidade dos resultados obtidos. O resultado que apresentou a maior dispersão do desvio padrão em relação à média foi para a análise dos entalhes de 4,2 mm a 4,5 mm, com dispersão de 55,0 %. Já, a menor dispersão foi para a análise dos entalhes de 4,2 a 4,5 mm com 9,9 % de dispersão. Além disso, no gráfico de colunas da Fig. 4.14 é notável que os resultados obtidos para os diferentes pares de análise não seguiram uma tendência e estão dispostos. Entretanto, há uma correlação moderada de -0,39 entre os comprimentos de entalhe e os resultados de  $J_C$  indicando que quanto maior o comprimento do entalhe do par analisado, menor o valor de  $J_C$ .

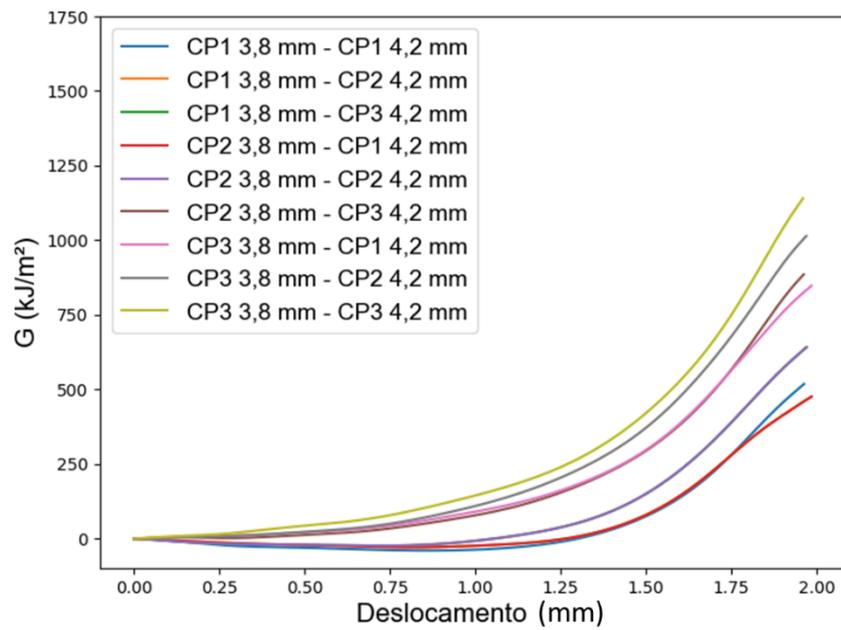


Figura 4.12 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,8 e 4,2 mm na direção longitudinal.

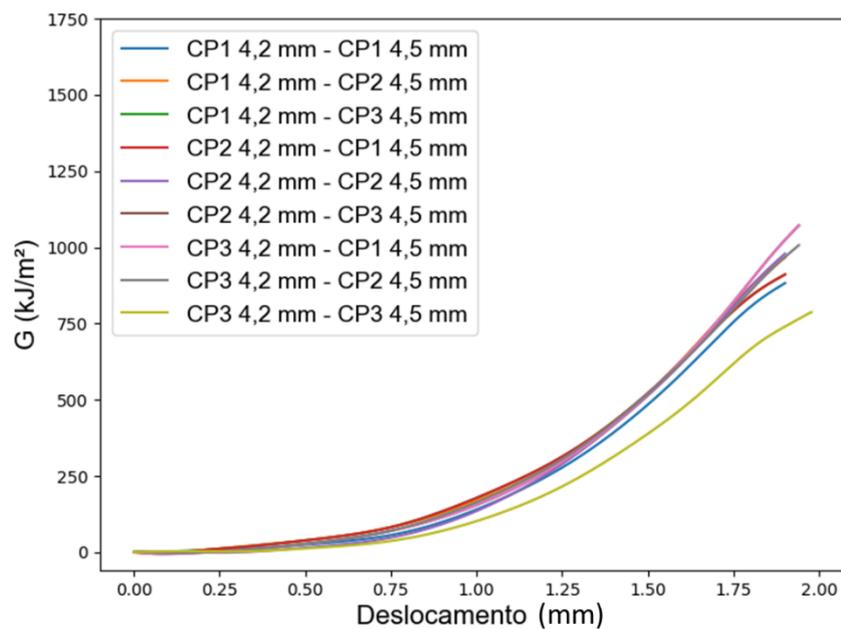


Figura 4.13 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 4,2 e 4,5 mm na direção longitudinal.

Tabela 4.8 – Resultados de  $J_C$  para o método da taxa de alívio de energia na direção longitudinal.

Entalhe (mm)	CP1-CP1	CP1-CP2	CP1-CP3	CP2-CP1	CP2-CP2	CP2-CP3	CP3-CP1	CP3-CP2	CP3-CP3	Média (kJ/m <sup>2</sup> )	S (kJ/m <sup>2</sup> )
3,0-3,3	860	691	592	374	246	139	1087	899	805	633	321
3,3-3,5	1465	1033	736	1615	1165	850	1654	1213	904	1182	335
3,5-3,8	1041	685	453	1172	800	555	1224	860	619	823	274
3,8-4,2	264	266	372	545	545	656	724	722	838	548	209
4,2-4,5	720	776	758	720	777	758	586	640	622	707	72

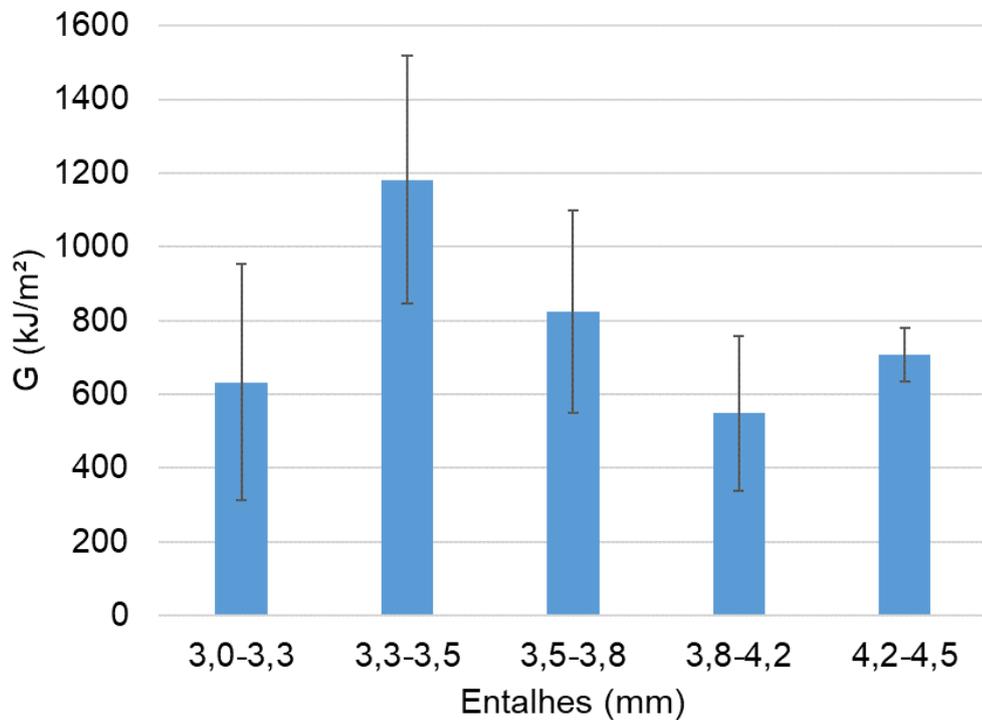


Figura 4.14 – Resultados de  $J_C$  para cada par de entalhes na direção longitudinal. As barras de erro representam o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 %.

#### 4.3.2 Direção Transversal

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os gráficos da taxa de alívio de energia pelo deslocamento do punção para os comprimentos de entalhe de 3,8 mm a 4,2 mm e de 4,2 mm a 4,5 mm, respectivamente, para a direção transversal do aço AISI 304. Os resultados de  $J_C$  para os pares de entalhes analisados são apresentados na Tab. 4.8.

Similar à direção longitudinal, os resultados apresentam grandes dispersões, sendo a menor dispersão de 9,9 % para o par de entalhes de 3,8-4,2 mm. Também, há uma correlação moderada de -0,37 entre os valores de  $J_C$  e o comprimento de entalhe. Além disso, pode-se constatar que os resultados obtidos para os pares de entalhes de 3,5-3,8 mm e 4,2-4,5 mm foram os menores devido ao fato que as curvas de resultado desses pares possuem baixa dispersão e a diferença entre às áreas dessas curvas é pequena, como mencionado anteriormente.

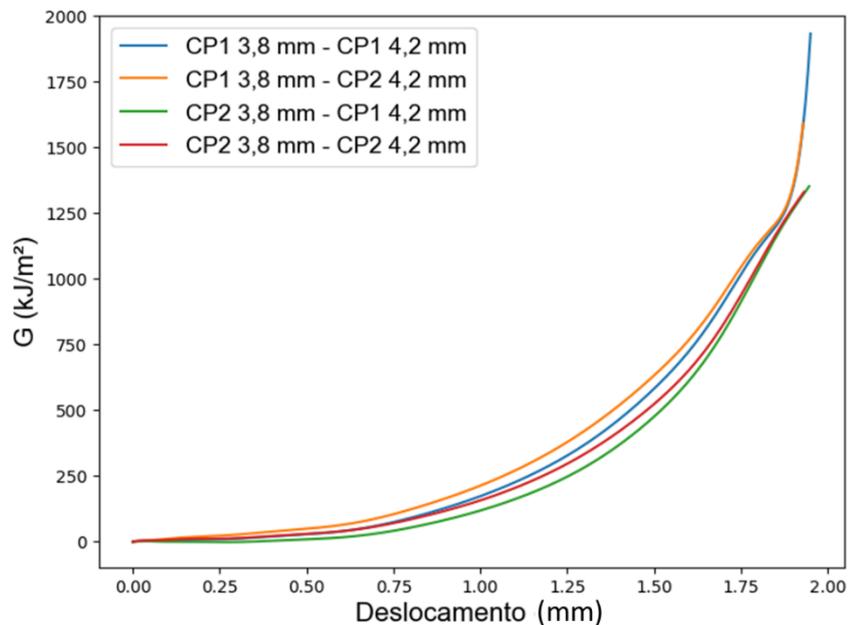


Figura 4.15 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,8 e 4,2 mm na direção transversal.

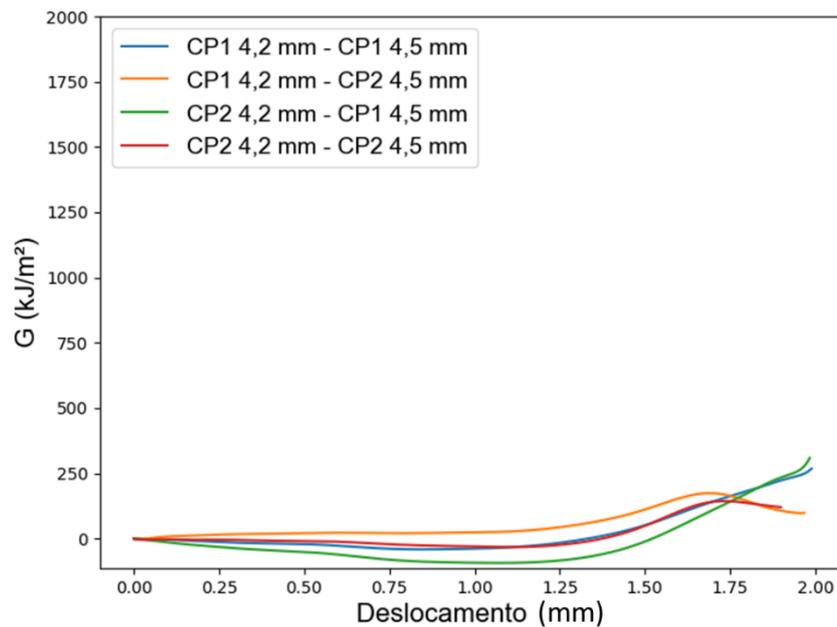


Figura 4.16 - Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 4,2 e 4,5 mm na direção transversal.

Tabela 4.9 - Resultados de  $J_C$  para o método da taxa de alívio de energia na direção transversal.

Entalhe (mm)	CP1-CP1 (kJ/m <sup>2</sup> )	CP1-CP2 (kJ/m <sup>2</sup> )	CP2-CP1 (kJ/m <sup>2</sup> )	CP2-CP2 (kJ/m <sup>2</sup> )	Média (kJ/m <sup>2</sup> )	S (kJ/m <sup>2</sup> )
3,0-3,3	827	574	438	168	502	275
3,3-3,5	182	354	592	779	477	262
3,5-3,8	386	527	276	411	400	103
3,8-4,2	741	784	629	669	705	70
4,2-4,5	128	172	89	133	130	34

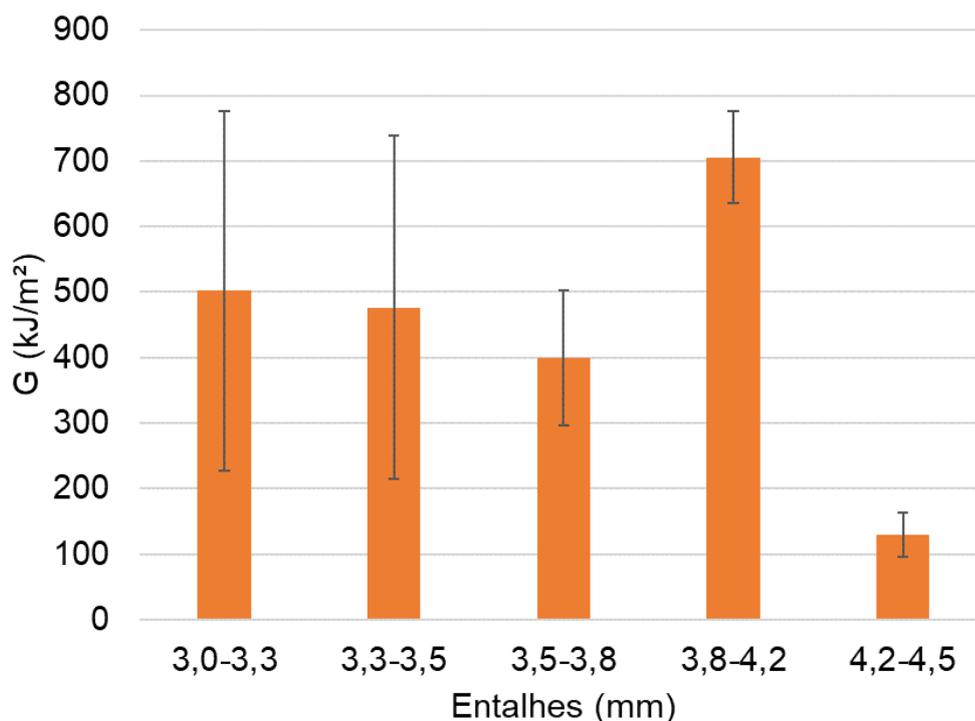


Figura 4.17 - Resultados de  $J_c$  para cada par de entalhes na direção transversal. As barras de erro representam o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 %.

#### 4.4 Discussões

O gráfico da Fig. 4.18 resume os resultados obtidos para ambos os métodos analisados. Os dois métodos apresentaram valores de  $J$  maiores para a direção longitudinal do que para a direção transversal, evidenciando sua capacidade de quantificar a anisotropia de tenacidade à fratura do material. Em destaque, a tenacidade obtida por meio do método Lacalle na direção longitudinal foi 11,5 % maior que a da direção transversal.

É amplamente conhecido que os aços inoxidáveis AISI 304 são excepcionalmente resistentes à fratura e exibem uma resposta de fratura dúctil sob uma ampla gama de condições. A Figura 4.19 exhibe o comportamento da tenacidade à fratura  $J_c$  do AISI 304 em temperaturas variando de 24 °C até 550 °C. Nota-se que para a temperatura ambiente a tenacidade à fratura varia de 169 a 1660 kJ/m<sup>2</sup>, com um valor médio de 672 kJ/m<sup>2</sup>. Já para temperaturas de 400 °C a tenacidade variou de 130 a 1420 kJ/m<sup>2</sup>, com média de 421 kJ/m<sup>2</sup>. Essa dispersão deve-se da falta de padronização da espessura dos corpos de prova dos ensaios de  $J_c$ , ocasionando em ensaios em diferentes estados plano de tensões ou

deformações. Além disso, a dispersão é acentuada devido a diferença de lotes de produção do material (MILLS, 1996).

Ao comparar os resultados alcançados neste estudo com aqueles encontrados na literatura, observa-se que ambos os métodos produziram resultados consistentes com a faixa de resultados dos ensaios convencionais da literatura. Contudo, é importante notar que o método da taxa de alívio de energia apresenta incerteza significativa e uma dispersão considerável, tanto para um mesmo conjunto de entalhes analisados quanto entre diferentes conjuntos de entalhes. Essa dispersão pode ser oriunda da consideração de que a propagação da trinca nos ensaios SPT ocorre no ponto de força máxima para os cálculos do método. Mas, Foulds e Viswanathan (1994) e Foulds et al. (1995) mostraram que o início de propagação da trinca ocorre, muitas vezes, antes do ponto de força máxima para aços.

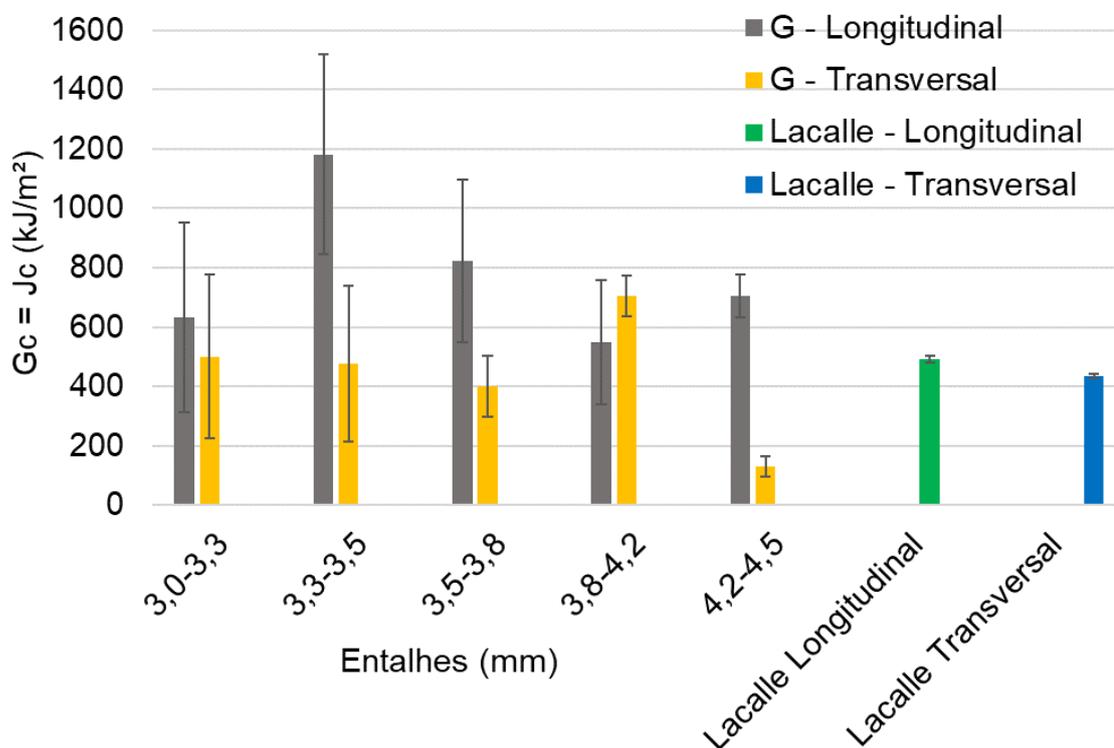


Figura 4.18 – Resultados dos valores de J dos métodos Lacalle e da Taxa de Alívio de Energia para o aço inoxidável AISI 304. As barras de erro representam o desvio padrão com nível de confiança de 68,27 %.

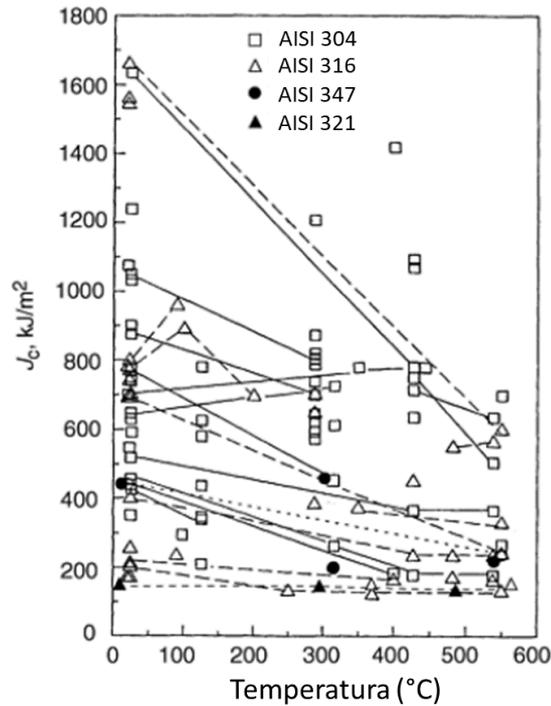


Figura 4.19 – Tenacidade à fratura  $J_c$  de aços inoxidáveis austeníticos em diferentes temperaturas de ensaio (MILLS, 1996).

Devido à dificuldade de obter resultados confiáveis para a tenacidade do AISI 304, é factível avaliar a tenacidade deste material via SPT por meio da comparação com o resultado do método para outros materiais que podem ser validados por ensaios convencionais. A Tabela 4.10 apresenta os resultados de  $J_Q$  obtidos pelo método Lacalle de diferentes aços. Assim, pode-se dizer que dos aços apresentados o AISI 304 apresenta a maior tenacidade à fratura.

Tabela 4.10 – Resultados de  $J_Q$  da literatura obtidos via método Lacalle.

Material	$J_Q$ (kJ/m <sup>2</sup> )
AISI 304 – LT (atual)	491,9
AISI 304 – TL (atual)	435,5
E690 (Lacalle et al. 2008)	250,7
Grade A (Lacalle et al. 2008)	143,6
4340 (Almeida et al. 2023)	193,7
4130M (Almeida et al. 2023)	182,9

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÃO

Neste trabalho, avaliou-se a tenacidade à fratura do AISI 304 nas direções longitudinal e transversal por meio do ensaio de puncionamento esférico instrumentado. Para tanto, foi utilizada a técnica de múltiplos corpos de prova entalhados lateralmente e as metodologias de análise de resultados do método Lacalle e da Taxa de Alívio de Energia.

O método Lacalle obteve como resultado a construção da curva de resistência (J-R), bem como os valores de  $J_Q$  de 492 kJ/m<sup>2</sup> para a direção longitudinal e de 436 kJ/m<sup>2</sup> para a direção transversal. Já o método da taxa de alívio de energia (G), obteve os valores de  $G_C = J_C$  para o caso de estado plano de tensão utilizando diferentes pares de corpos de prova com entalhes distintos.

Ambos os métodos foram capazes de identificar a anisotropia do material, fornecendo valores de J maiores para a direção longitudinal, bem como obtiveram resultados dentro da faixa de resultados dos ensaios convencionais da literatura. Contudo, o método da taxa de alívio de energia apresenta incerteza significativa e dispersão considerável para cada par de comprimento de entalhe analisados.

Além disso, os resultados do método Lacalle foram comparados com os resultados obtidos para diferentes materiais, o que fornece uma avaliação qualitativa da tenacidade à fratura do AISI 304. Dentre os aços AISI 304, 4340, 4130M, Grade A e E690, o AISI 304 apresentou a maior tenacidade à fratura.

Como subproduto deste trabalho, o *software* desenvolvido para processamento de dados e análise de resultados desempenhou um papel crucial, simplificando significativamente a obtenção de resultados e a criação de gráficos. Assim, otimizando o tempo de análise de resultados de trabalhos futuros na área de mecânica da fratura por meio do SPT.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Aprimorar o equipamento mediante adaptações para a instalação de uma câmera capaz de filmar o corpo de prova durante o ensaio, visando a identificação do ponto em que há início da propagação da trinca;
- b) Realizar mais ensaios experimentais utilizando corpos de prova entalhados de diferentes materiais, em especial ligas de elevada ductilidade e tenacidade, para desenvolver um banco de dados;
- c) Desenvolver a simulação do ensaio SPT para corpos de prova entalhados via método dos elementos finitos.

## CAPÍTULO VI

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGRE, J. M.; CUESTA, I. I.; BARBACHANO, H. L. Determination of the fracture properties of metallic materials using pre-cracked small punch tests. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, vol. 38, p. 104-112, 2014. <https://doi.org/10.1111/ffe.12222>

ALEGRE, J. M.; LACALLE, R.; CUESTA, I. I.; ÁLVAREZ, J. A. Different methodologies to obtain the fracture properties of metallic materials using pre-notched small punch test specimens. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 86, p. 11-18, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.09.006>

ALMEIDA, L. F. M. **Simulação de Ensaios de Puncionamento Esférico Utilizando o Método dos Elementos Finitos**. 2017. 86 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2017.323>

ALMEIDA, L. F. M.; OLIVEIRA, S. A. G.; PAES, M. T. P.; NETO, F. F. R.; FRANCO, S. D.; ARENCIBIA, R. V. Effect of test velocity on the tensile strength of high strength steels using the small punch test in hydrogen environment. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 194, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104552>

ALMEIDA, L. F. M. **Avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência e baixa liga usando ensaios de puncionamento esférico em meio assistido**. 2022. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5021>

ALMEIDA, L. F. M.; PERES, J. G. F.; MARTINIANO, G. A.; FERREIRA, D. C. F.; BOSE FILHO, W. W.; FRANCO, S. D. J-R curve evaluation using the multiple specimen technique by means

of the Small Punch Test. **6th International Conference Small Sample Test Techniques**. 2023.

ÁLVAREZ, G.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; GARCÍA, T. E. Use of notched small punch test specimens for the determination of fracture properties in structural steels. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 106, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102442>

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3 ed. CRC Press, 2005. 640 p.

ASTM A240-23 **Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications**. American Society of Testing and Materials, 2023. [https://doi.org/10.1520/A0240\\_A0240M-22A](https://doi.org/10.1520/A0240_A0240M-22A)

ASTM E1820-23 **Standard Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2023. <https://doi.org/10.1520/E1820-18>

ASTM E3205-20 **Standard Test Method for Small Punch Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2020. <https://doi.org/10.1520/E3205-20>

BRITO, G. F. R. **Determinação de propriedades mecânicas e avaliação da fragilização por hidrogênio do Inconel 718 via ensaio de puncionamento esférico**. 2022. Projeto de Finalização de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/35873>

CEN Workshop Agreement. **Small-Punch Test Method for Metallic Materials**. CWA 15627:2007, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007.

CUESTA, I. I.; ALEGRE, J. M. Determination of the fracture toughness by applying a structural integrity approach to pre-cracked Small Punch Test specimens. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 78, p. 289-300, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2010.09.004>

DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 4 ed. London: Pearson, 2012. 954 p.

FOULDS, J. R.; VISWANATHAN, R. Small punch testing for determining the material toughness of low alloy steel components in service. **Journal of Engineering and Materials Technology**, vol. 116, p. 457-464, 1994. <https://doi.org/10.1115/1.2904313>

FOULDS, J. R.; WOYTOWITZ, P. J.; PARNELL, T. K.; JEWETT, C. W. Fracture toughness by small Punch testing. **Journal of Testing and Evaluation**, vol. 23, p. 3-10, 1995. <https://doi.org/10.1520/JTE10392J>

GARCÍA, T. E.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; SUÁREZ, C. Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test. **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 582, p. 708-717, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.08.009>

HURST, R.; LI, Y.; TURBA, K. Determination of fracture toughness from the small punch test using circular notched specimens. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 103, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102238>

ISO 12135 **Metallic Materials - Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness**. International Standard, 2016.

LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J. A.; GUTIÉRREZ-SOLANA, F. Use of small punch notched specimens in the determination of fracture toughness. American Society of Mechanical Engineers, **Pressure Vessels and Piping Conference**, vol. 6, p. 1363-1369, 2008. <https://doi.org/10.1115/PVP2008-61537>

LAI, H. S.; JIANG, X. Determination of fracture toughness through small punch test of notched-tube specimen. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 279, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109059>

LI, Y.; MATOCHA, K.; HURST, R.; ČIŽEK, P.; TURBA, K.; STEVENS, P. Experimental verification to determine fracture toughness from the small punch test using “Local approach”. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 102, p. 16-29, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.03.015>

MAO, X.; SAITO, M.; TAKAHASHI, H. Small Punch test to predict ductile fracture toughness Jic and brittle fracture toughness Kic. **Scripta Metallurgica et Materialia**, vol. 25, p. 2481-2485, 1991. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0956-716X(91)90053-4)

MAO, X.; Takahashi, H.; Kodaira, T. Estimation of mechanical properties of irradiated nuclear pressure vessel steel by use of subsized CT specimen and small punch specimen. **Scripta Metallurgica et Materialia**, vol. 25, p. 2487-2490, 1991. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(91\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0956-716X(91)90054-5)

MAO, X; Takahasi, H.; Kodaira, T. Supersmall Punch test to estimate fracture toughness Jic and its application to radiation embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel. **Materials Science and Engineering**, vol. 150, p. 231-236, 1992. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(92\)90116-1](https://doi.org/10.1016/0921-5093(92)90116-1)

MARTÍNEZ-PAÑEDA, E.; CUESTA, I. I.; PEÑUELAS, I.; DÍAZ, A.; ALEGRE, J. M. Damage modeling in small punch test specimens. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, vol. 86, p. 51-60, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.09.002>

MILLS, W. J. Fracture Toughness of Austenitic Stainless Steel and Their Welds. Em: Fatigue and Fracture. **ASM International**, vol. 19, p. 733-756, 1996.

RODRÍGUEZ, C.; GARCÍA, J.; CÁRDENAS, E.; BELZUNCE, F. J.; BETEGÓN, C. Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test. **Welding Journal**, vol. 88, p. 188-192, 2009.

SHIKALGAR, T. D.; DUTTA, B. K.; CHATTOPADHYAY, J. Determination of J-initiation toughness using pre-cracked small punch test specimens. **Procedia Structural Integrity**, vol. 14, p. 529-536, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.063>

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 2 ed. Sumaré, SP: Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988. 512p.

TANAKA, K.; AMITA, T.; SATOU, T.; KOKA, K.; KUSUMOTO, J.; KANAYA, A. Evaluation on high temperature fracture toughness of CrMoV cast steel by small punch testing. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 86, p. 643-648, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.04.006>

TORRES, J; GORDON, A. P. Mechanics of the small punch test: a review and qualification of additive manufacturing materials. **Journal of Materials Science**, vol. 56, p. 10707-10744, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05929-8>

TURBA, K.; GÜLÇİMEN, B.; LI, Y. Z.; BLAGOEVA, D.; HÄHNER, P.; HURST, R. C. Introduction of a new notched specimen geometry to determine fracture properties by small punch testing. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 78, p. 2826-2833, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.08.014>

ZHU, X.; JOYCE, J. A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. **Engineering Fracture Mechanics**, vol. 85, p. 1-46, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001>

## APÊNDICE A – VERIFICAÇÃO DIMENSIONAL DOS CORPOS DE PROVA DE ENSAIO DE PUNÇIONAMENTO ESFÉRICO

Tabela A.1 – Verificação dimensional da espessura dos corpos de prova da direção longitudinal.

Amostra \ Leitura	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)	Média (mm)	s (mm)
3,0 mm CP1	0,500	0,502	0,501	0,500	0,501	0,501	0,001
3,0 mm CP2	0,503	0,505	0,504	0,503	0,504	0,504	0,001
3,0 mm CP3	0,499	0,498	0,499	0,500	0,498	0,499	0,001
3,3 mm CP1	0,504	0,503	0,503	0,504	0,503	0,503	0,001
3,3 mm CP2	0,505	0,504	0,505	0,504	0,505	0,505	0,000
3,3 mm CP3	0,503	0,501	0,501	0,503	0,503	0,502	0,001
3,5 mm CP1	0,503	0,501	0,503	0,503	0,504	0,503	0,001
3,5 mm CP2	0,504	0,505	0,504	0,505	0,504	0,504	0,000
3,5 mm CP3	0,503	0,501	0,501	0,503	0,503	0,502	0,001
3,8 mm CP1	0,499	0,500	0,499	0,498	0,498	0,499	0,001
3,8 mm CP2	0,503	0,502	0,501	0,502	0,503	0,502	0,001
3,8 mm CP3	0,502	0,502	0,501	0,501	0,502	0,502	0,000
4,2 mm CP1	0,505	0,502	0,504	0,503	0,503	0,503	0,001
4,2 mm CP2	0,503	0,502	0,502	0,502	0,503	0,502	0,000
4,2 mm CP3	0,501	0,501	0,499	0,501	0,500	0,500	0,001
4,5 mm CP1	0,504	0,505	0,504	0,503	0,502	0,504	0,001
4,5 mm CP2	0,502	0,503	0,502	0,502	0,502	0,502	0,000
4,5 mm CP3	0,503	0,503	0,503	0,503	0,502	0,503	0,000

Tabela A.2 – Verificação dimensional do comprimento do entalhe dos corpos de prova da direção longitudinal.

<b>Leitura</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Média</b>	<b>s (mm)</b>
<b>Amostra</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	
3,0 mm CP1	2,992	2,992	2,981	2,975	2,988	2,986	0,007
3,0 mm CP2	2,990	2,988	2,988	2,983	2,975	2,985	0,006
3,0 mm CP3	2,983	2,990	2,985	2,982	2,983	2,985	0,003
3,3 mm CP1	3,262	3,262	3,263	3,271	3,269	3,265	0,004
3,3 mm CP2	3,252	3,256	3,254	3,254	3,256	3,255	0,001
3,3 mm CP3	3,275	3,261	3,260	3,272	3,273	3,268	0,007
3,5 mm CP1	3,445	3,470	3,458	3,462	3,460	3,459	0,009
3,5 mm CP2	3,480	3,478	3,472	3,472	3,470	3,474	0,004
3,5 mm CP3	3,456	3,480	3,470	3,466	3,470	3,468	0,009
3,8 mm CP1	3,787	3,779	3,784	3,780	3,775	3,781	0,005
3,8 mm CP2	3,781	3,781	3,775	3,774	3,773	3,777	0,004
3,8 mm CP3	3,783	3,779	3,784	3,791	3,775	3,782	0,006
4,2 mm CP1	4,182	4,182	4,175	4,179	4,173	4,178	0,004
4,2 mm CP2	4,176	4,179	4,183	4,186	4,179	4,181	0,004
4,2 mm CP3	4,173	4,172	4,173	4,172	4,175	4,173	0,001
4,5 mm CP1	4,499	4,499	4,498	4,502	4,512	4,502	0,006
4,5 mm CP2	4,500	4,509	4,499	4,494	4,492	4,499	0,007
4,5 mm CP3	4,495	4,499	4,504	4,503	4,499	4,500	0,004

Tabela A.3 – Verificação dimensional da espessura dos corpos de prova da direção transversal.

<b>Leitura</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Média</b>	<b>s (mm)</b>
<b>Amostra</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	
3,0 mm CP1	0,503	0,503	0,504	0,503	0,503	0,503	0,000
3,0 mm CP2	0,496	0,496	0,497	0,497	0,497	0,497	0,000
3,3 mm CP1	0,505	0,505	0,504	0,504	0,504	0,504	0,000
3,3 mm CP2	0,502	0,500	0,501	0,502	0,503	0,502	0,001
3,5 mm CP1	0,501	0,501	0,500	0,501	0,501	0,501	0,000
3,5 mm CP2	0,501	0,503	0,503	0,504	0,503	0,503	0,001
3,8 mm CP1	0,498	0,501	0,500	0,501	0,501	0,500	0,001
3,8 mm CP2	0,504	0,503	0,503	0,502	0,501	0,503	0,001
4,2 mm CP1	0,503	0,502	0,503	0,504	0,504	0,503	0,001
4,2 mm CP2	0,500	0,500	0,499	0,499	0,498	0,499	0,001
4,5 mm CP1	0,504	0,502	0,502	0,504	0,505	0,503	0,001
4,5 mm CP2	0,503	0,503	0,505	0,503	0,503	0,503	0,001

Tabela A.4 - Verificação dimensional do comprimento do entalhe dos corpos de prova da direção transversal.

<b>Leitura</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Média</b>	<b>s (mm)</b>
<b>Amostra</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(mm)</b>	
3,0 mm CP1	3,285	3,288	3,278	3,281	3,284	3,283	0,004
3,0 mm CP2	2,993	3,000	2,990	2,985	2,991	2,992	0,005
3,3 mm CP1	3,285	3,288	3,278	3,281	3,284	3,283	0,004
3,3 mm CP2	3,275	3,282	3,275	3,274	3,276	3,276	0,003
3,5 mm CP1	3,471	3,484	3,478	3,479	3,482	3,479	0,005
3,5 mm CP2	3,476	3,474	3,472	3,476	3,471	3,474	0,002
3,8 mm CP1	3,770	3,766	3,772	3,773	3,770	3,770	0,003
3,8 mm CP2	3,762	3,757	3,762	3,767	3,766	3,763	0,004
4,2 mm CP1	4,184	4,188	4,187	4,187	4,183	4,186	0,002
4,2 mm CP2	4,179	4,180	4,178	4,186	4,175	4,180	0,004
4,5 mm CP1	4,466	4,455	4,459	4,457	4,458	4,459	0,004
4,5 mm CP2	4,468	4,463	4,467	4,461	4,465	4,465	0,003

## APÊNDICE B – CURVAS DE RESPOSTA ORIGINAIS E PROCESSADAS DO MATERIAL AISI 304 NA DIREÇÃO LONGITUDINAL

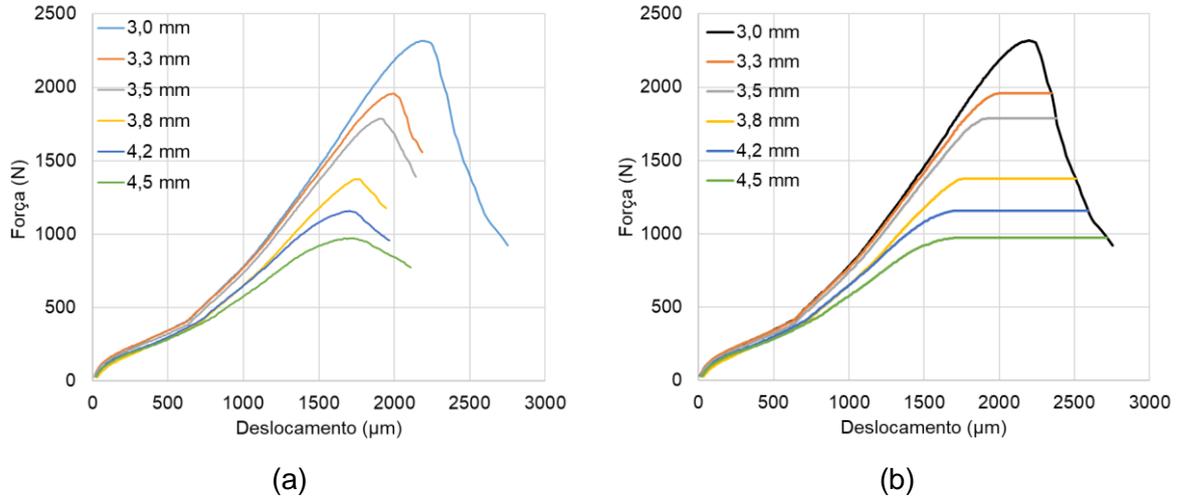


Figura B.1 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

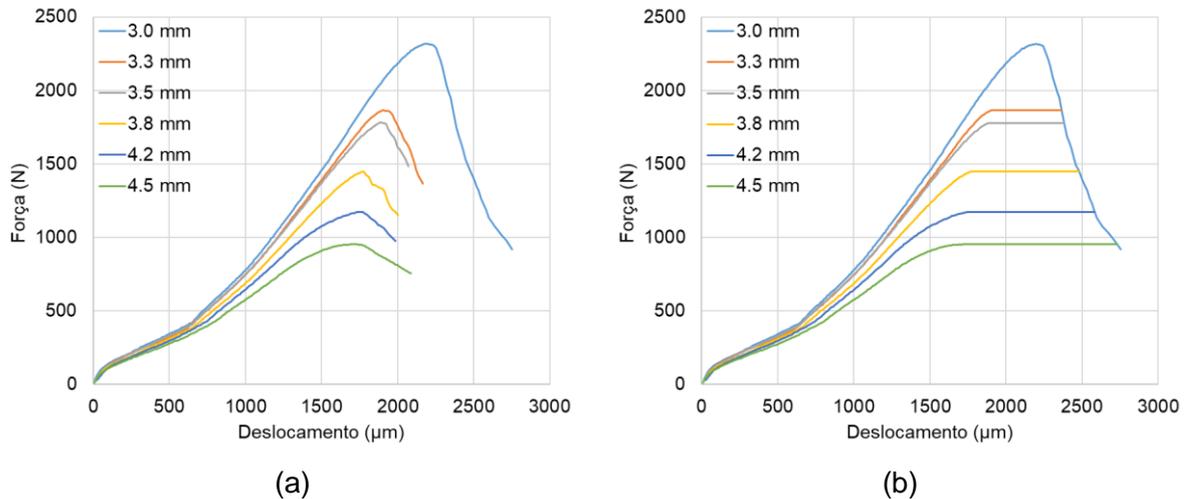


Figura B.2 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

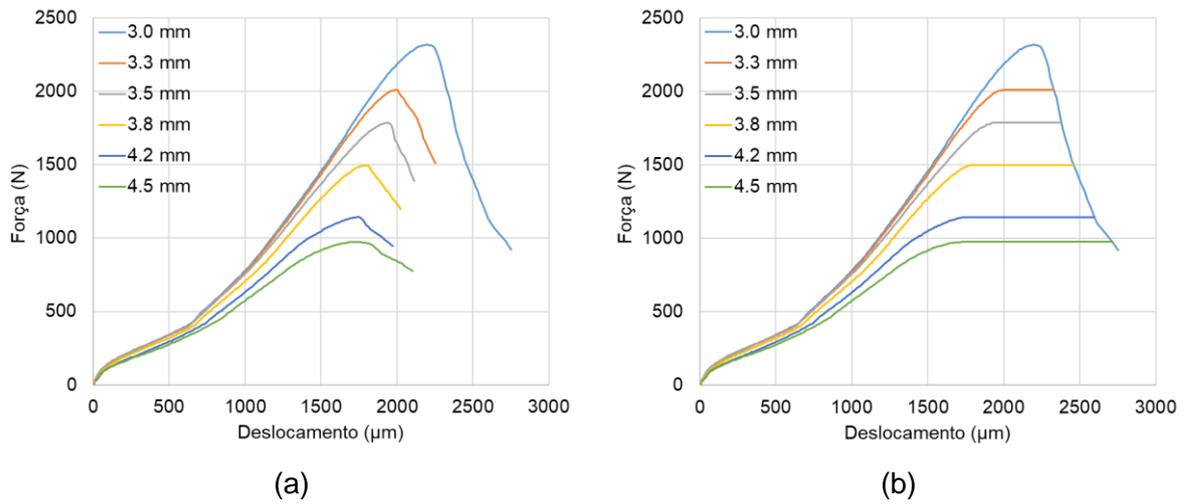


Figura B.3 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP3 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

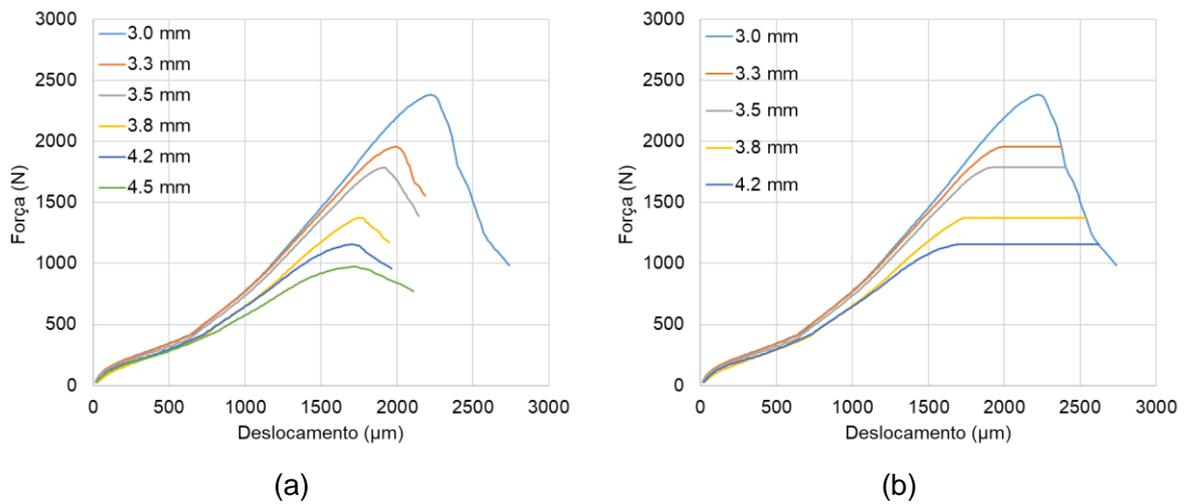
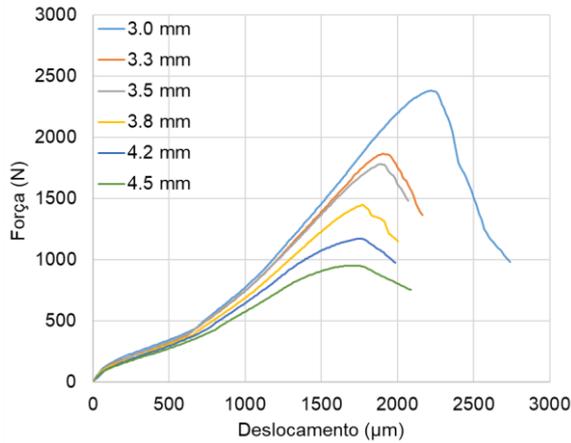
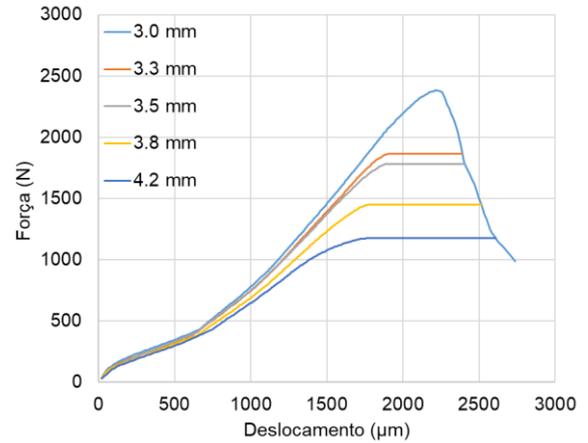


Figura B.4 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

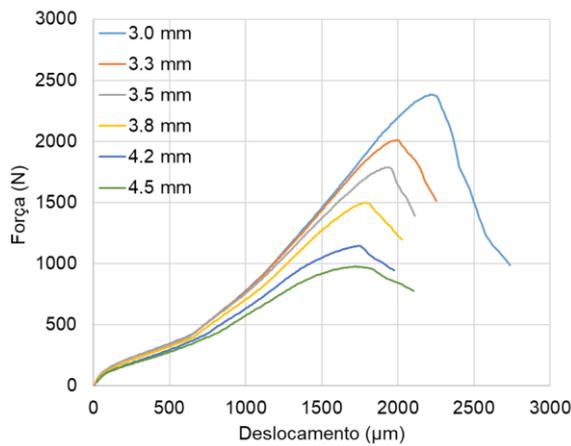


(a)

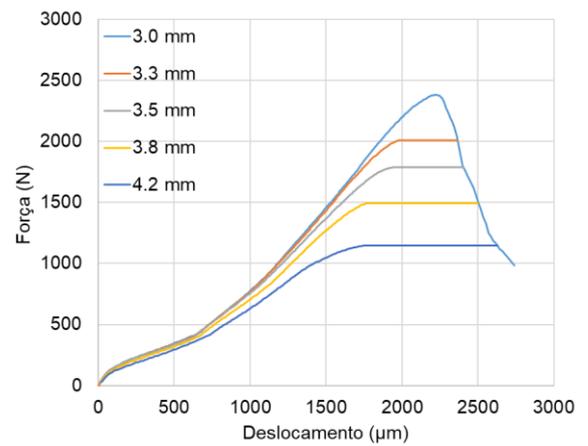


(b)

Figura B.5 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

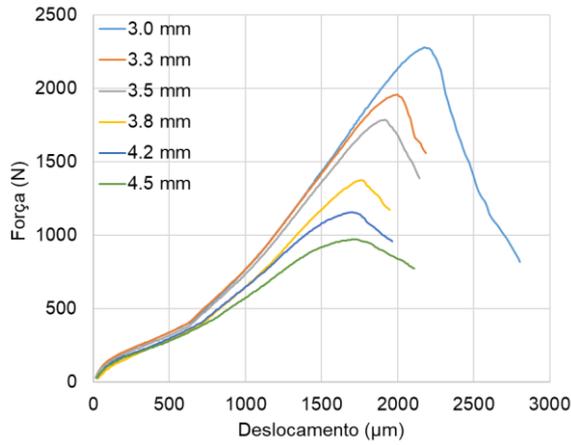


(a)

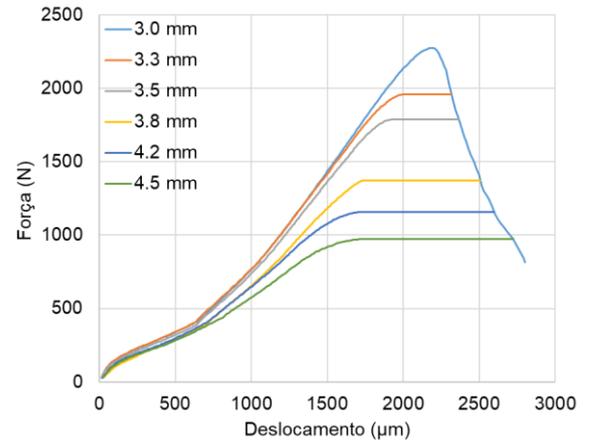


(b)

Figura B.6 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP3 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

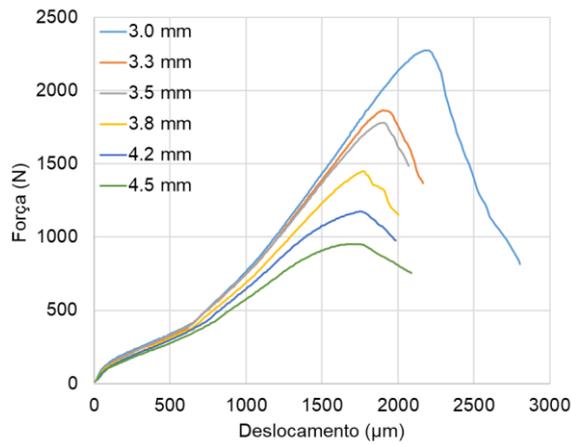


(a)

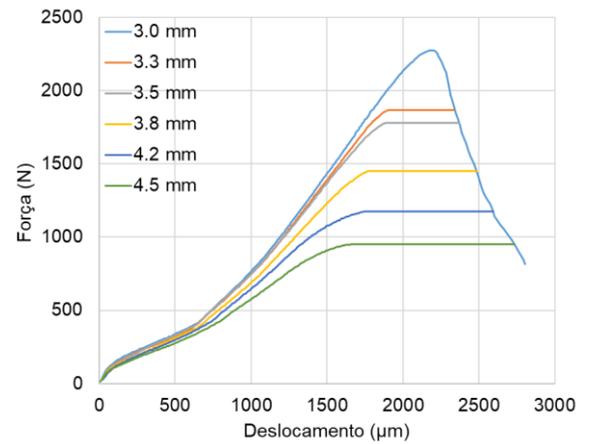


(b)

Figura B.7 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP3 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.



(a)



(b)

Figura B.8 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP3 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

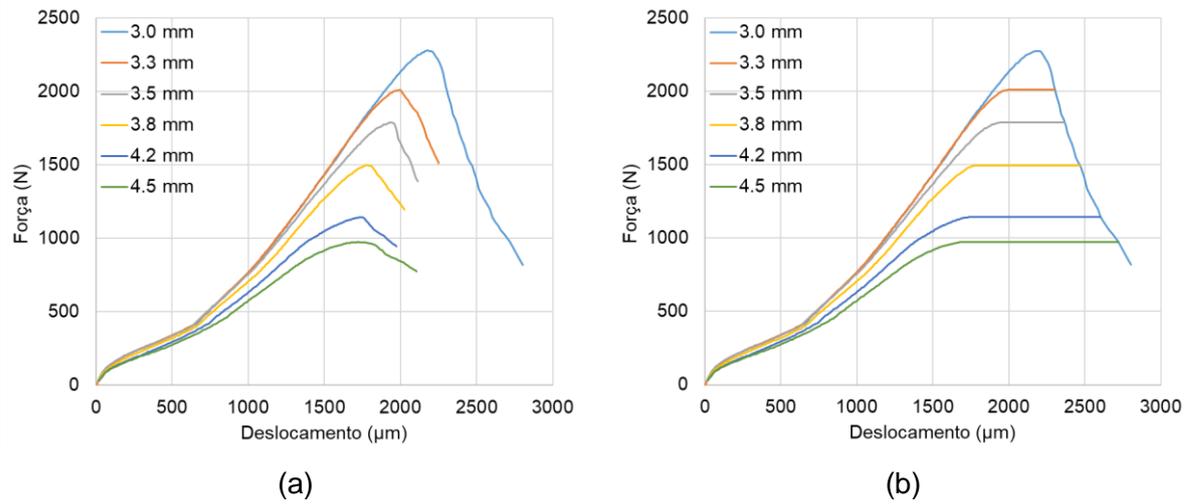


Figura B.9 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP3 como referência e CP3 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

### APÊNDICE C – CURVAS J-R DO AÇO AISI 304 NA DIREÇÃO LONGITUDINAL

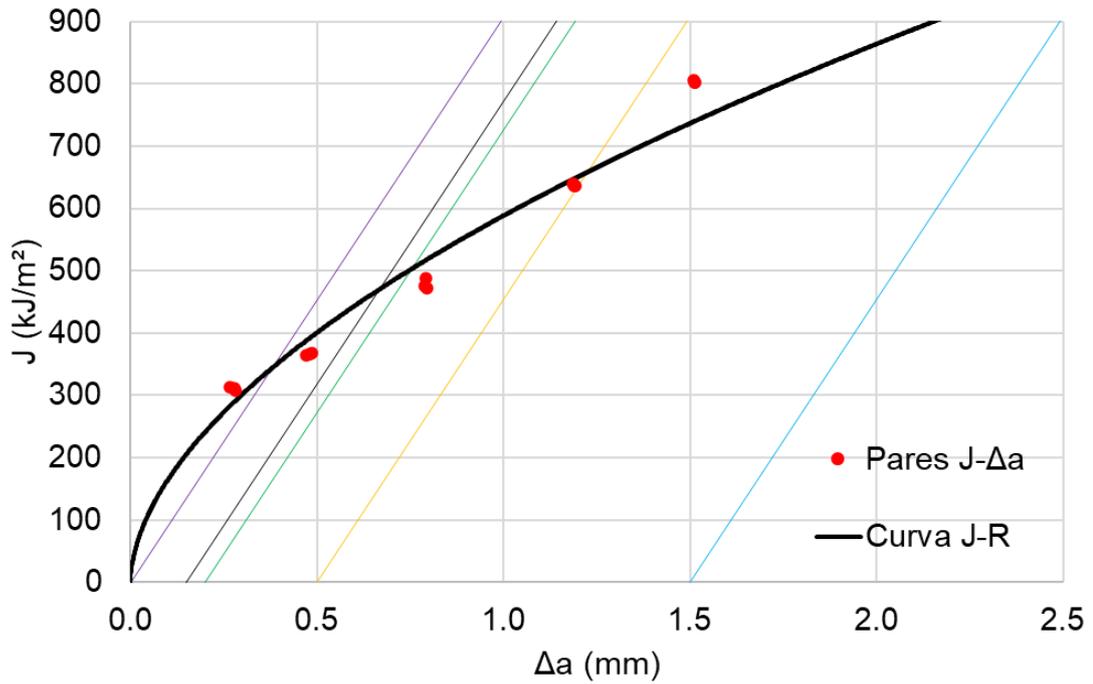


Figura C.1 – Curva J-R construída utilizando o CP1 como referência na direção longitudinal.

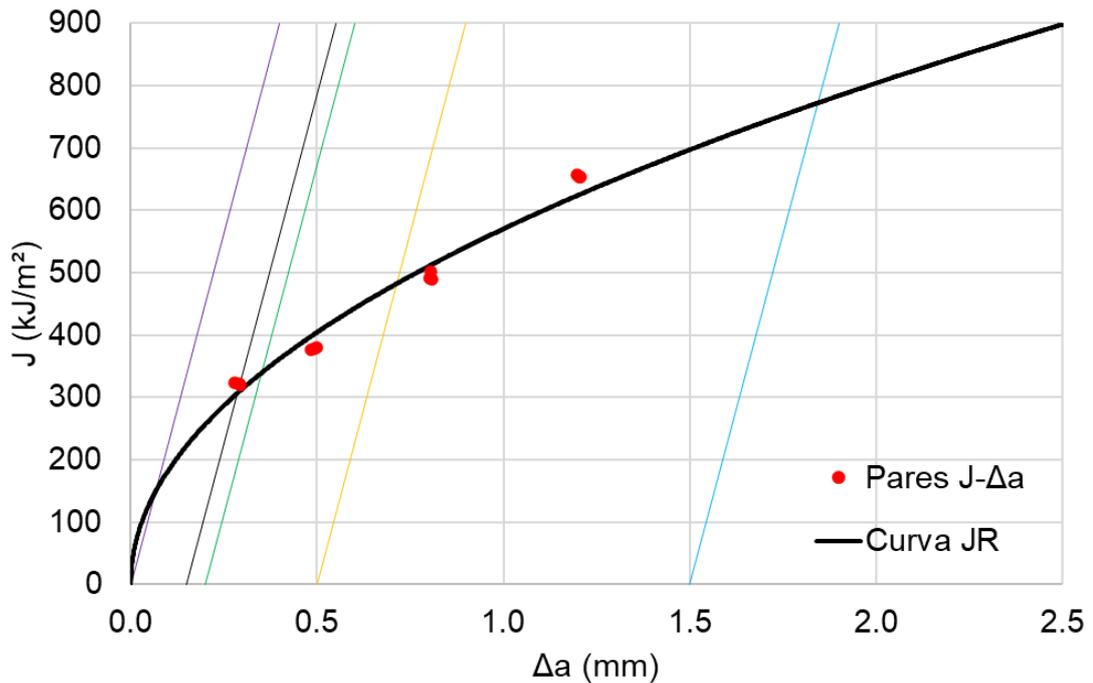


Figura C.2 – Curva J-R construída utilizando o CP2 como referência na direção longitudinal.

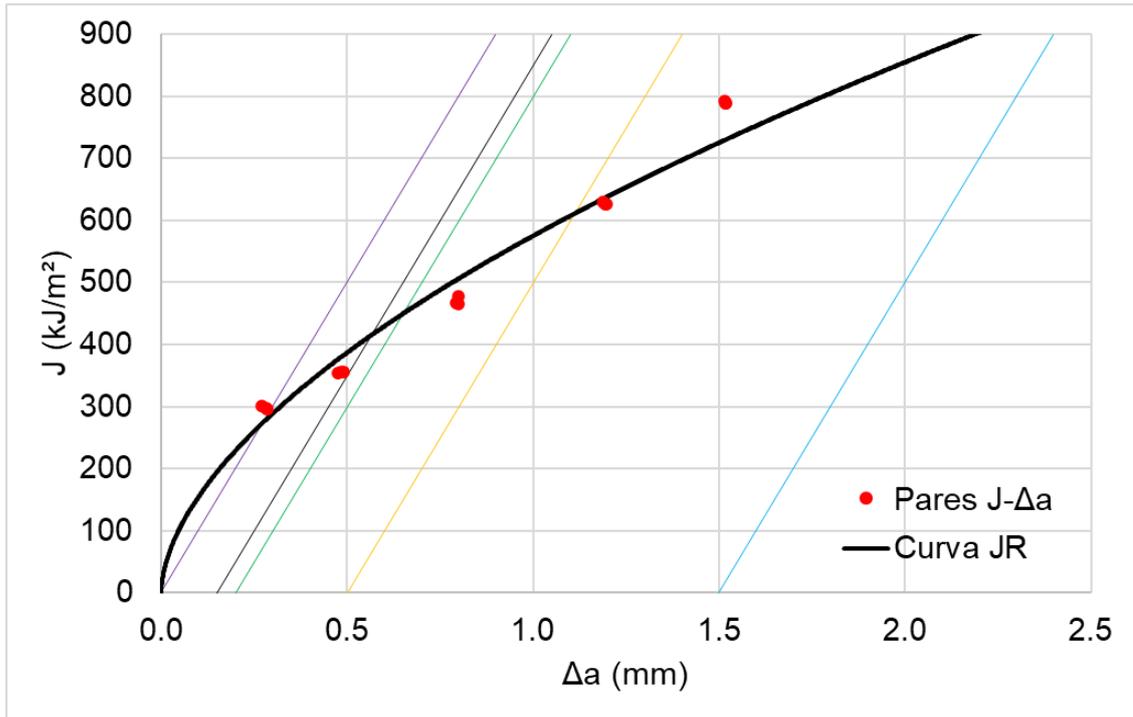
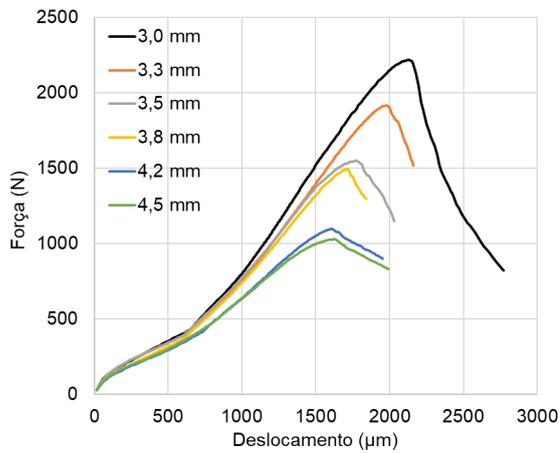
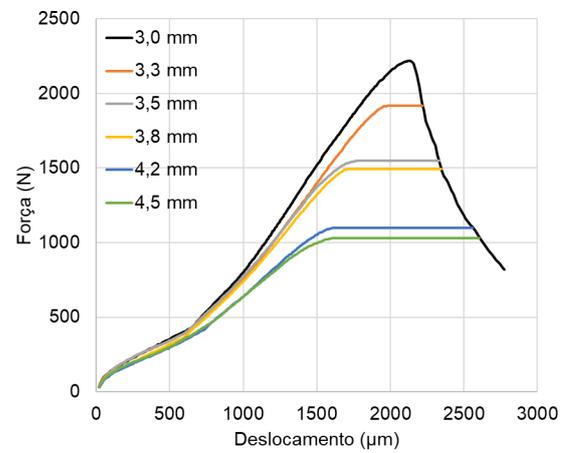


Figura C.3 – Curva J-R construída utilizando o CP3 como referência na direção longitudinal.

## APÊNDICE D – CURVAS DE RESPOSTA ORIGINAIS E PROCESSADAS DO MATERIAL AISI 304 NA DIREÇÃO TRANSVERSAL

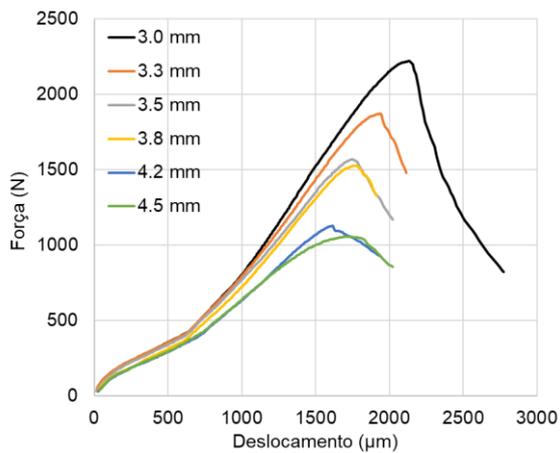


(a)

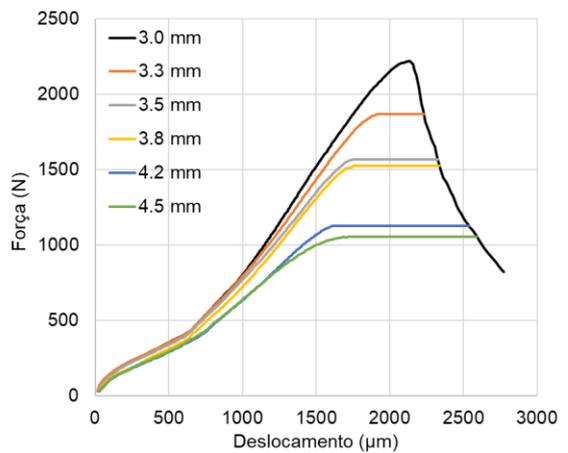


(b)

Figura D.1 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

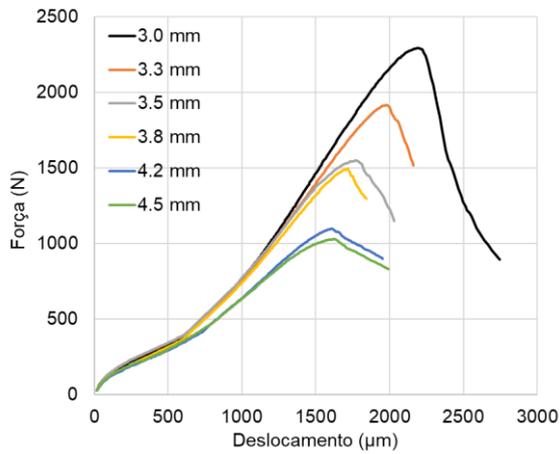


(a)

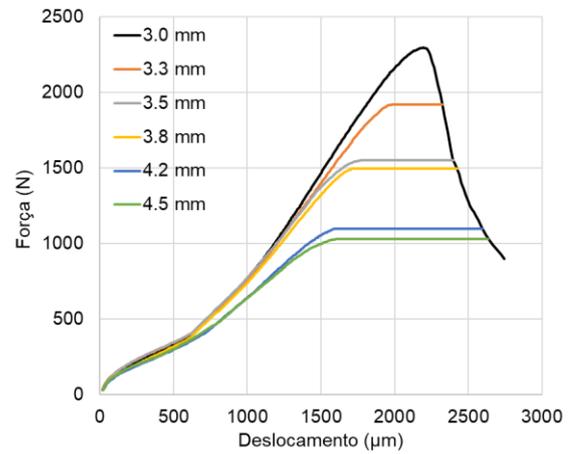


(b)

Figura D.2 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP1 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

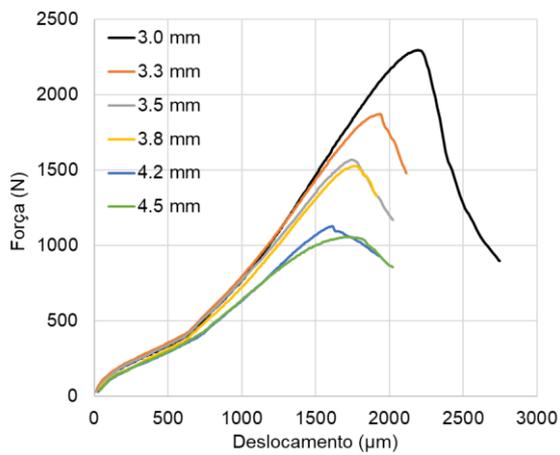


(a)

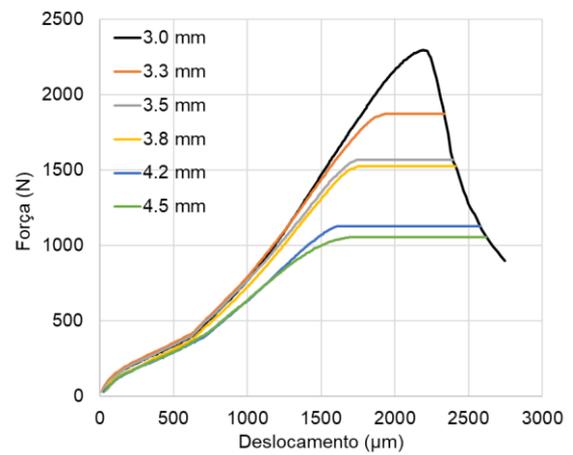


(b)

Figura D.3 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP1 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.



(a)



(b)

Figura D.4 – Conjunto de curvas de resposta SPT para CP2 como referência e CP2 nas demais curvas: (a) Originais e (b) Processadas.

## APÊNDICE E – CURVAS RESULTANTES DO MÉTODO DA TAXA DE ALÍVIO DE ENERGIA PARA A DIREÇÃO LONGITUDINAL

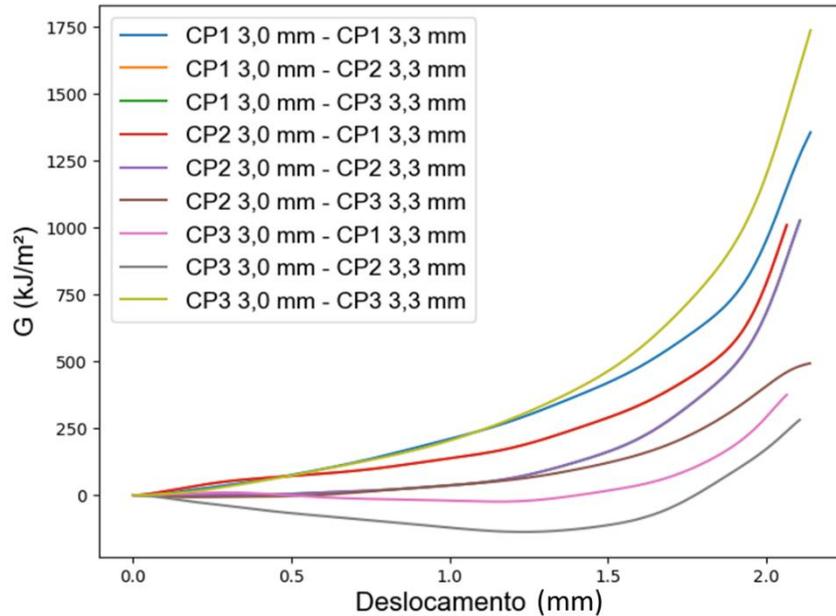


Figura E.1 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,0 e 3,3 mm.

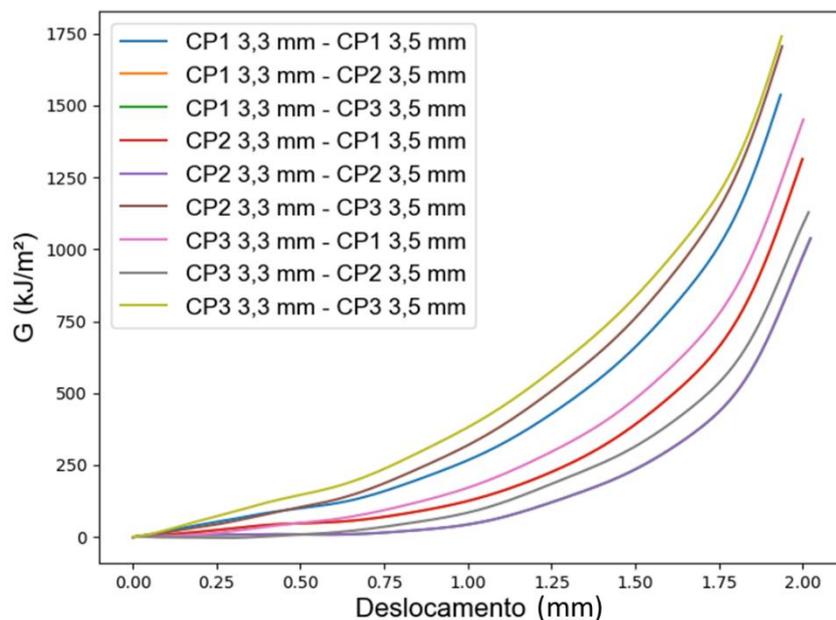


Figura E.2 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,3 e 3,5 mm.

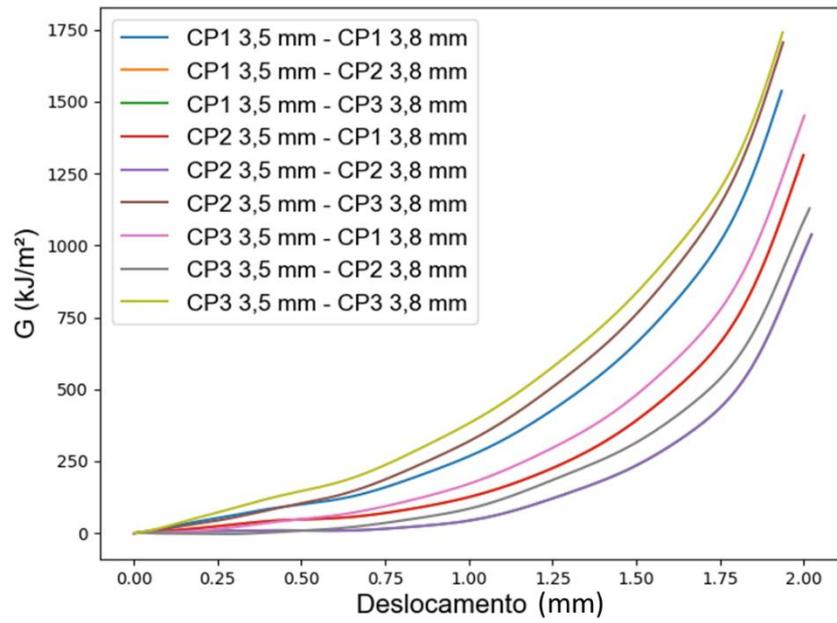


Figura E.3 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,5 e 3,8 mm.

## APÊNDICE F – CURVAS RESULTANTES DO MÉTODO DA TAXA DE ALÍVIO DE ENERGIA PARA A DIREÇÃO TRANSVERSAL

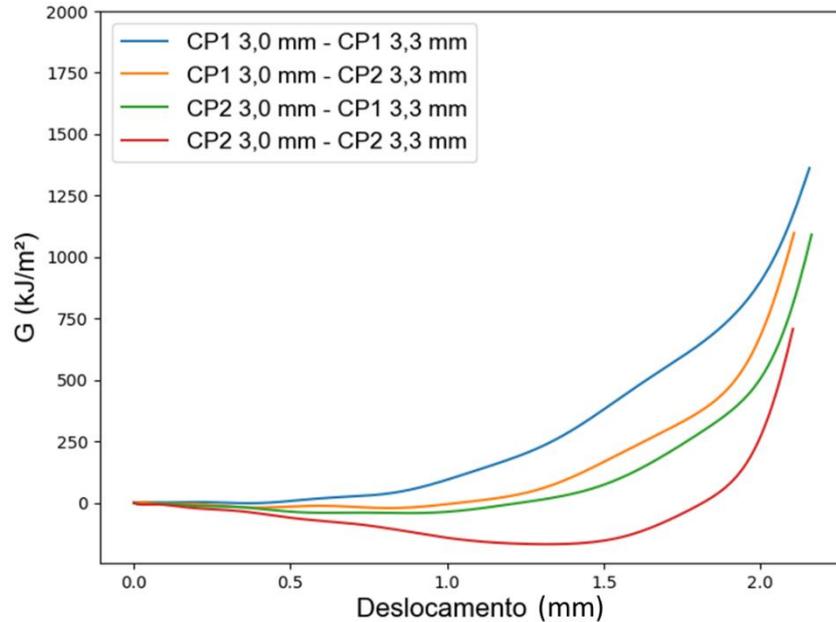


Figura F.1 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,0 e 3,3 mm.

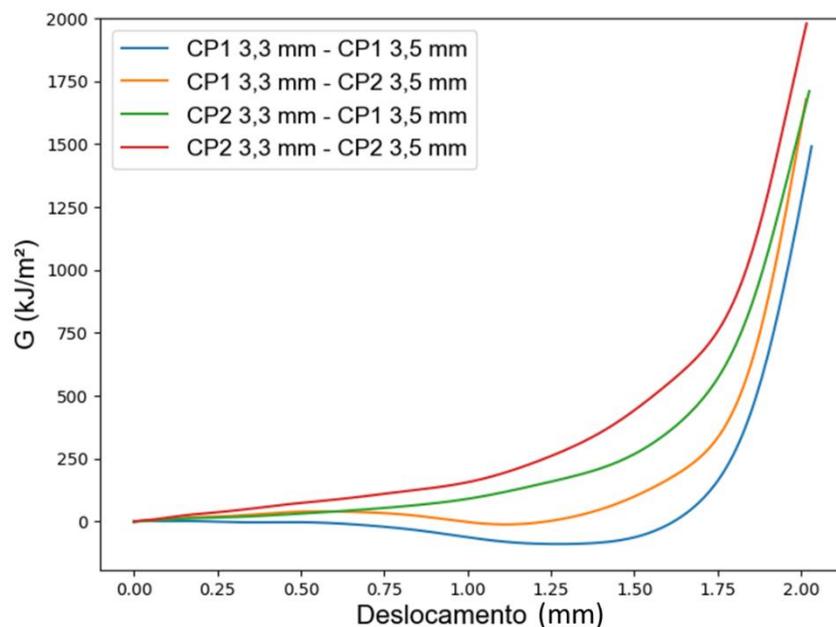


Figura F.2 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,3 e 3,5 mm.

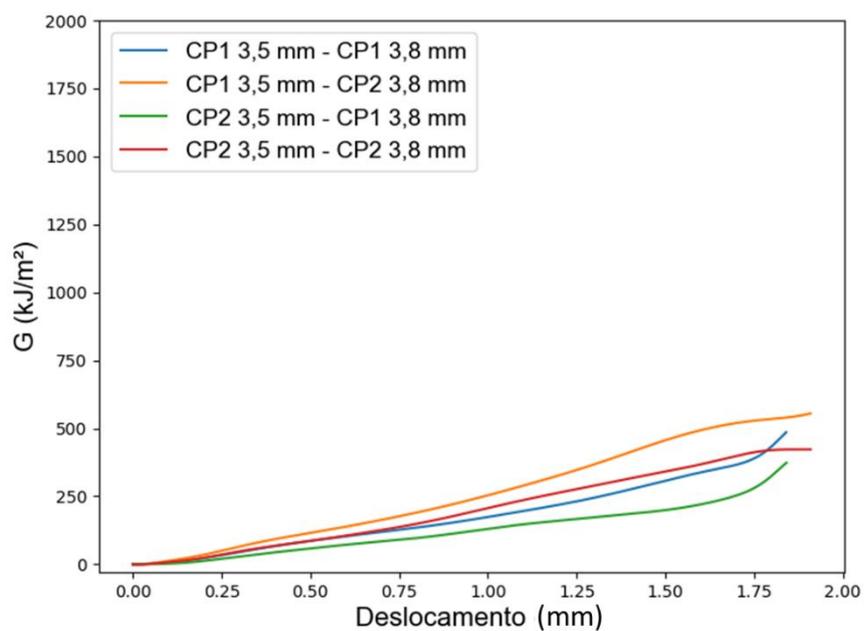


Figura F.3 – Taxa de Alívio de Energia obtido experimentalmente via curvas do SPT para entalhes de comprimento de 3,5 e 3,8 mm.

## ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO MICRÔMETRO DIGITAL



### Certificado de Calibração Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: 70518/18

Data Calibração: 02/05/2018

OS: 468630-A/2018

1 / 2

**Solicitante:** FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO  
RUA ENGENHEIRO DINIZ, 1178, UBERLÂNDIA, MG

**Contratante:** O MESMO

**Características do Instrumento**

Descrição: **MICRÔMETRO DIGITAL**

Identificação: **MIC-04**

Marca: MITUTOYO

Nº. Serie: 63085404

**Condições Ambientais:**

Serviço executado nas instalações permanentes do Laboratório.

Temperatura: **20,8 °C ± 1 °C** Umidade: **43 %ur ± 5%ur**

**Procedimentos**

Calibração Executada conforme: ITTEC002

Revisão: 4

**Padrões**

**Identificação**

PTM-0685 JOGO DE BLOCO PADRAO

**Marca**  
DIGIMESS

**Certificado**  
01229/17

**Calibrado por**  
MITUTOYOCAL0031

**Validade**  
03/2020

**Resultados Obtidos**

**DIMENSIONAL**

Faixa de Uso: **0,000 a 25,000 mm**

Faixa de Indicação: **0,000 a 25,000 mm**

Resolução: 0,001 mm

V.R	V.I	Erro de Medição	Incerteza Expandida	Incerteza Expandida + Erro	( k )	Veff
mm	mm	mm	mm	mm		
2,5	2,502	0,002	0,001	0,003	2,00	Infinito
5,1	5,106	0,006	0,001	0,007	2,00	Infinito
7,7	7,707	0,007	0,001	0,008	2,00	Infinito
10,3	10,304	0,004	0,001	0,005	2,00	Infinito
12,9	12,904	0,004	0,001	0,005	2,00	Infinito
15,0	15,004	0,004	0,001	0,005	2,00	Infinito
17,6	17,607	0,007	0,001	0,008	2,00	Infinito
20,2	20,201	0,001	0,001	0,002	2,00	Infinito
22,8	22,805	0,005	0,001	0,006	2,00	Infinito
25,0	25,002	0,002	0,001	0,003	2,00	Infinito



## Certificado de Calibração Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: 70518/18

Data Calibração: 02/05/2018

OS: 468630-A/2018

2 / 2

### Observações Gerais

NÃO HOUVE AJUSTE

- V.R: Valor de Referência na unidade de medição do padrão.
- V.I: Valor médio indicado no instrumento na unidade de medição do mesmo.
- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- A condição de Aprovado/Reprovado se restringe apenas as grandezas metrológicas do instrumento, sendo que o limite de erro especificado para esta condição é de responsabilidade do Cliente.
- A operação de ajuste / regulagem não faz parte do escopo dos serviços
- A validade de calibração do instrumento, quando apresentada neste certificado, é de responsabilidade do cliente.

Endereço de Emissão: RUA DIVINO LUCAS MARTINS, 330 - SARAIVA - UBERLÂNDIA - MG  
Data de emissão: 02 de maio de 2018

*Leandro Silva de Bastos*

Assinado Eletronicamente  
LEANDRO SILVA DE BASTOS  
Gerente Técnico



Digitally signed by LEANDRO  
SILVA DE BASTOS:09319225699  
Date: 2018.05.03 10:39:18 -03:00  
Reason: Certificado de Calibração  
Location: Laboratorio Medicao  
Uberlandia

O CONTEÚDO APRESENTADO NESTE DOCUMENTO/REGISTRO TEM SIGNIFICADO RESTRITO E SE APLICA SOMENTE A ESTA SITUAÇÃO. É PROIBIDA A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO MESMO SEM A AUTORIZAÇÃO DO EMITENTE.

## ANEXO B – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO PROJETO DE PERFIL



LABORATÓRIO  
DE  
METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº. 00587/20



**Interessado : FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO**

Endereço : Rua Francisco Vicente Ferreira, Nº 126 - Uberlândia - MG - CEP: 38408.102

Local da calibração : Rua Francisco Vicente Ferreira, Nº 126 - Uberlândia - MG - CEP: 38408.102

**Ordem de Serviço : 051.037/001**

Pág.1/4

### 1 - OBJETO CALIBRADO

#### PROJETO DE PERFIL

Fabricante : Mitutoyo

Código : 302-714A

Modelo : PJ-300

No. de Série : D00101012

Tambor Micrométrico

Código : 164-164

Nº. série : 000636

Código : 164-164

Nº. série : 000619

Resolução da unidade de leitura : 0,001 mm

Resolução do goniômetro : 0 ° 01 '

Identificação do Proprietário : 088180

### 2 - PADRÃO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO

#### Régua Graduada de Vidro

Nº. de Série : 28728

Certificado Nº. : 05148/18 - RBC - Mitutoyo Validade: 08/2020

Nº. de Série : 27151

Certificado Nº. : 05149/18 - RBC - Mitutoyo Validade: 08/2020

#### Padrão Angular

Nº. de Série : RET-03

Certificado Nº. : 1397/19 - RBC - IPT Validade: 04/2021

### 3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO : PML - 0043 Versão 1/2.

O erro de ampliação e a indicação foi verificado projetando a régua padrão sobre a tela do projetor e a medição através de comparação com a régua.

O erro de indicação do goniômetro foi verificado comparativamente com um padrão angular projetado sobre a tela e a leitura feita no goniômetro.

Data de calibração : 03 de Fevereiro de 2020

Data de emissão : 06 de Fevereiro de 2020

  
Cláudio Bueno de Moraes  
Signatário Autorizado

Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida ( ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI ).  
A reprodução deste certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.

Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

**Endereço:** Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

**Laboratório:** Tel.: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br

**Assistência Técnica Interna:** Tel.: (11) 4746-5957 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br

**Assistência Técnica Externa:** Tel.: (11) 5643-0026 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br



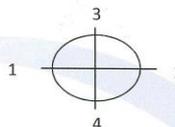
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 00587/20**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0031

Pág.2/4

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :****4.1 - Resultado Ampliação**

Lente de Ampliação de 10 X

Número lente: 013012

Item	Posição				Incerteza de Medição ( U )	Fator de abrangência ( k )	Graus de liberdade ( V <sub>eff</sub> )
	1	2	3	4			
Erro ( % )	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01 %	2,00	infinito

LABORATÓRIO DE  
CALIBRAÇÃO  
BRASIL

Endereço: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
 Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
 Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
 Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0026 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br





Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º. 00587/20**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, o sob número CAL 0031

Pág.3/4

**4.2 - Resultado da Indicação****Eixo " X "**

Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )
0,000	0,000	0,002
2,500	2,500	
5,100	5,099	
7,700	7,700	
10,300	10,299	
12,900	12,899	
15,000	15,000	
17,600	17,600	
20,200	20,199	
22,800	22,801	
25,000	25,000	
30,000	30,001	
35,000	35,001	
40,000	40,002	
45,000	45,001	
50,000	50,002	

**Eixo " Y "**

Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )
0,000	0,000	0,002
2,500	2,500	
5,100	5,099	
7,700	7,700	
10,300	10,299	
12,900	12,900	
15,000	14,999	
17,600	17,599	
20,200	20,198	
22,800	22,799	
25,000	24,999	
30,000	30,000	
35,000	34,999	
40,000	40,000	
45,000	45,000	
50,000	50,001	

Fator de abrangência ( k ) = 2,03

Graus de liberdade ( Veff ) = 99

Fator de abrangência ( k ) = 2,03

Graus de liberdade ( Veff ) = 99

Endereço: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0026 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 00587/20

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág.4/4

### 4.3 - Resultado da indicação do Anteparo Goniométrico

Indicação	Resultado	Incerteza de Medição ( U )	Fator de abrangência ( k )	Graus de liberdade ( V <sub>eff</sub> )
0 °	0 ° 00 '			
30 °	29 ° 59 '			
60 °	59 ° 59 '			
90 °	90 ° 00 '			
120 °	120 ° 00 '			
150 °	149 ° 59 '			
180 °	180 ° 01 '	0 ° 01 '	2,29	11
210 °	210 ° 00 '			
240 °	240 ° 00 '			
270 °	270 ° 00 '			
300 °	300 ° 00 '			
330 °	330 ° 00 '			
360 °	360 ° 00 '			

### 5 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO :

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V<sub>eff</sub> graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota: Temperatura ambiente : ( 20,1 ± 0,5 ) °C.

## ANEXO C – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMOHIDRÔMETRO DIGITAL



*Certificado de Calibração*

*Laboratório de Temperatura & Umidade*



*Número do Certificado* R4996/13 *Folha* 1 / 2

CONTRATANTE : Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
 ENDEREÇO : Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG  
 INTERESSADO : O mesmo  
 ENDEREÇO : O mesmo

INSTRUMENTO : Termohigrômetro Digital  
 FABRICANTE : Instrutherm  
 MODELO : HT-260  
 IDENTIFICAÇÃO : Não especificado  
 NÚMERO DE SÉRIE : 06120362

DATA DA CALIBRAÇÃO : 19/06/2013 LOCAL DA CALIBRAÇÃO : Laboratório Elus  
 PRÓXIMA CALIBRAÇÃO : Determinado pelo cliente TEMPERATURA DO AR : 23°C ± 5°C  
 DATA DA EMISSÃO : 20/06/2013 UMIDADE RELATIVA AR : 45%UR a 70%UR

PADRÕES UTILIZADOS :  
 Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :  
 - A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.

OBSERVAÇÕES :  
 - Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.  
 - A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.  
 - Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.  
 -  $k$  = fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) /  $v_{eff}$  = graus de liberdade efetivo. / I.M. = Incerteza de Medição.

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA

Julio Cesar Pereira de Souza  
 Gerente Técnico Substituto  
 RODRIGO BOMES CORDEIRO  
 GERENTE TÉCNICO

A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Rua Dendezeiro, 29 | Jd. Matarazzo | São Paulo | SP | 03813-130 | Tel 11 2214-0049 | Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br



## Certificado de Calibração

### Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 2 / 2

Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

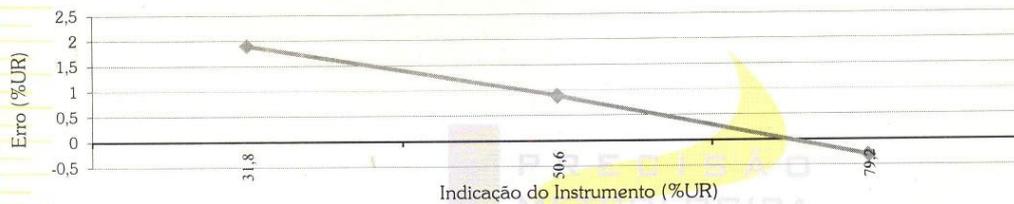
#### RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

##### UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO : TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado

Faixa de medição: 0 ~ 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.

Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞

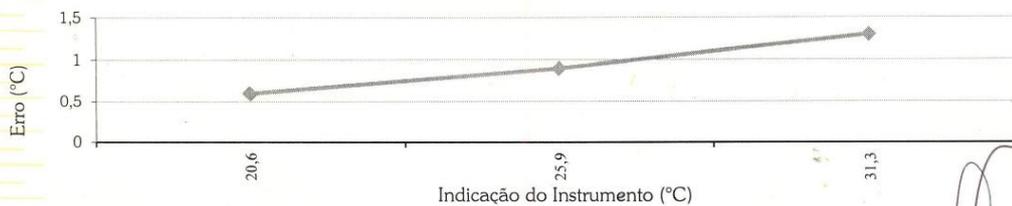


#### TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n°.s.: Não especificado

Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

Imersão (mm)	Indicação do Instrum. (°C)	Valor Verdadeiro (°C)	Erro (°C)	I.M. (°C)	k	Veff
---	20,6	20,0	0,6	0,3	2,00	∞
---	25,9	25,0	0,9	0,3	2,00	∞
---	31,3	30,0	1,3	0,3	2,00	∞



A reprodução deste certificado só poderá ser total, sem nenhuma alteração. Os Resultados deste certificado referem-se somente ao item calibrado ou ensaiado. Este certificado atende os requisitos estabelecidos pela norma NBR ISO/IEC 17025. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência "k" que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Rua Dendezeiro, 29 | Jd. Matarazzo | São Paulo | SP | 03813-130 | Tel 11 2214-0049 | Email: atendimento@elusinstrumentacao.com.br