

**GUILHERME BERNARDES RODRIGUES**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA: MÉTODO  
TESTE DE TORÇÃO EM ENTALHE HELICOIDAL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2020**

# **GUILHERME BERNARDES RODRIGUES**

## **AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA: MÉTODO TESTE DE TORÇÃO EM ENTALHE HELICOIDAL**

**Dissertação** apresentada ao Programa  
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de  
Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia  
Co-orientador: Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho

**UBERLÂNDIA – MG**

**2020**

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

R696 Rodrigues, Guilherme Bernardes, 1995-  
2020 Avaliação da tenacidade à fratura: método Teste de Torção em  
Entalhe Helicoisal [recurso eletrônico] / Guilherme Bernardes  
Rodrigues. - 2020.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.  
Coorientador: Waldek Wladimir Bose Filho.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.8>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Arencibia, Rosenda Valdés ,1969-,  
(Orient.). II. Bose Filho, Waldek Wladimir ,1959-, (Coorient.). III.  
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica. IV. 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 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34) 3239-4282 - [www.posgrad.mecanica.ufu.br](http://www.posgrad.mecanica.ufu.br) - [secposmec@mecanica.ufu.br](mailto:secposmec@mecanica.ufu.br)



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 558, COPEM			
Data:	dez de fevereiro de dois mil e vinte	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento: <b>[11:40]</b>
Matrícula do Discente:	11812EMC006			
Nome do Discente:	Guilherme Bernardes Rodrigues			
Título do Trabalho:	Avaliação da Tenacidade à Fratura: Método Teste de Torção em Entalhe Helicoidal			
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação			
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Avaliação de propriedades mecânicas e integridade sob hidrogenação em amostras miniaturas (HIDRO)			

Reuniu-se na Sala de Reuniões do LTAD, Bloco 5F, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Waldek Wladimir Bose Filho (co-orientador) - EESC/USP; Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU; Sônia Aparecida Goulart Oliveira - FEMEC/UFU e Rosenda Valdés Arencibia orientadora do candidato. Ressalta-se que o Dr. Marcelo Torres Piza Paes - PETROBRAS participou da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Rio de Janeiro/RJ e os demais membros da banca e o aluno participaram *in loco*.

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

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

**Aprovado.**

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

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 **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/02/2020, às 08:54, 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 **Waldek Wladimir Bose Filho, Usuário Externo**, em 12/02/2020, às 09:16, 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 **Marcelo Torres Piza Paes, Usuário Externo**, em 12/02/2020, às 09:18, 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 **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/02/2020, às 10:00, 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 **Sonia Aparecida Goulart de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 13/02/2020, às 17:44, 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 **1865319** e o código CRC **12A110A7**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Iracilda Ribeiro Bernardes Rodrigues e meu pai João Batista Rodrigues por terem estado ao meu lado em todos os percalços e desafios durante todo esse ciclo que se completa. Agradeço também ao meu irmão e toda minha família por me apoiarem e me amarem.

À Professora Rosenda Valdés Arencibia por ter se dedicado tão fielmente, realizando uma orientação responsável, carinhosa e cuidadosa ao longo de todo o mestrado, bem como, contribuindo para meu crescimento científico e pessoal.

Ao Professor Waldek Wladimir Bose Filho por ter sido não somente um co-orientador, mas sim um mestre de fundamental importância para o desenvolvimento de todo o trabalho. Obrigado pelos ensinamentos e pela dedicação.

Ao Professor Sinésio Domingues Franco por acreditar e me possibilitar o desenvolvimento de um trabalho tão desafiador e enriquecedor, e por ter sido de forma complementar um segundo co-orientador.

Ao Engenheiro Henry Fong Hwang por me dar a possibilidade de ser o responsável por esse projeto e oferecer toda a infraestrutura e apoio técnico para o desenvolvimento desse mestrado.

A todos os engenheiros, técnicos, alunos de graduação, estagiários e professores que compõe a equipe do LTAD, por terem compartilhado conhecimentos e experiências de grande valia, além de fazerem parte direta ou indiretamente de todo o desenvolvimento desse trabalho. Obrigado pela paciência e por me receberem tão bem. Em especial, agradeço à Joyce Antunes da Silva, Carollyne Caetano Alves Soares, Monique Alves Franco de Moraes Freitas e Thaís Lopes Oliveira pela leal amizade e companheirismo.

Aos Professores José Alexander Araújo e Fábio Gomes de Castro, bem como aos técnicos e alunos de pós-graduação Cainã e Lucas, da Universidade de Brasília, os quais nos auxiliaram e cordialmente nos deixaram utilizar o sistema de ensaio para a realização dos testes. Meu mais humilde muito obrigado a todos vocês.

Aos colegas de pós-graduação Guilherme Antonelli Martiniano, Edja Landeyara Freitas Moura, Luiz Fernando Maia de Almeida, Frederico Costa Souza e Guilherme Freitas Melo pela parceria e dicas no dia-a-dia.

Em especial agradeço a todos meus amigos, aquela família da qual escolhi fazer parte. Obrigado por sincera amizade, apoio e incentivo, além de me fazerem sorrir e acreditar em mim mesmo em toda essa trajetória.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar o Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica.

Ao CNPQ e à PETROBRAS pelo suporte financeiro na realização deste trabalho.

RODRIGUES, G. B. **Avaliação da tenacidade à fratura: método Teste de Torção em Entalhe Helicoidal.** 2020. 137 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

A tenacidade à fratura no estado plano de deformação ( $K_{IC}$ ) vem sendo amplamente utilizada como uma ferramenta no projeto de componentes estruturais e mecânicos. Ao longo dos anos, diversos métodos para determinação de  $K_{IC}$  foram desenvolvidos. Entretanto, estes possuem limitações significativas, principalmente no que se refere às dimensões dos corpos de prova. Com o objetivo de sanar as dificuldades para determinação de  $K_{IC}$ , Wang e Liu (2003) desenvolveram o método *Spiral Notch Torsion Test* (SNTT). Apesar de ser um método promissor, o SNTT ainda não foi adotado pela comunidade científica devido, principalmente, à falta de clareza da metodologia do ensaio. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo principal a determinação de  $K_{IC}$  utilizando o ensaio SNTT. Para tanto, se buscou o detalhamento e a validação de uma metodologia para o ensaio. Essa metodologia proposta foi validada por meio de ensaios em corpos de prova SNTT, tendo então seus resultados comparados com os obtidos pelo método convencional em corpos de prova C(T). Foi demonstrado que a metodologia é eficiente na determinação experimental de  $K_{IC}$ . A ANOVA indicou que os valores de  $K_{IC}$  obtidos por ambos os métodos são estatisticamente iguais. O erro sistemático, bem como o erro máximo, associados aos valores de  $K_{IC}$  obtidos pelo método SNTT foi de 2,7 %. Ainda, a repetibilidade e a incerteza expandida associadas aos valores de  $K_{IC}$  obtidos pelo método SNTT foram melhores que as observadas para o método convencional. Verificou-se que o método SNTT apresenta uma repetibilidade significativamente melhor (cerca de 52 % para o pior caso) que a observada na literatura estudada utilizando o método convencional. O crescimento da pré-trinca não foi uniforme ao longo de todo o entalhe, indicando a existência de um “efeito de borda” nas extremidades. Esse fato indica que a estimativa do ângulo final de parada deve ser melhorada.

RODRIGUES, G. B. **Fracture toughness evaluation: SNTT method.** 2020. 137 p. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Abstract

The fracture toughness in the plane strain ( $K_{IC}$ ) has been widely used as a mechanical and structural components project tool. Over the years, several  $K_{IC}$  determination methods were developed. However, they have significant limitations, mainly as regards to specimen dimensions. To overcome this problem, Wang and Liu (2003) developed the Spiral Notch Torsion Test (SNTT). Despite being a promising method, the SNTT has not been adopted by the scientific community mainly due to the lack of the test methodology clarity. This work aims the  $K_{IC}$  determination using the SNTT method. A SNTT test methodology were described and validated testing the AISI 4340 steel. The results obtained by the SNTT method were compared to those provided by conventional method testing C(T) specimens. The SNTT methodology for  $K_{IC}$  determination is efficient. The Analysis of Variance (ANOVA) technique was applied, and it was observed that the  $K_{IC}$  values obtained by both methods are statically equals. The systematic error, as the maximum error, associated with the  $K_{IC}$  values obtained by SNTT method was of 2.8 %. The repeatability and expanded uncertainty associated with  $K_{IC}$  values obtained by the SNTT method were better than those observed for the conventional method. The SNTT method provided  $K_{IC}$  values with excellent repeatability, smaller than those observed in the studied literature using conventional method (about 52 % for the worst case). Pre-crack growth was not uniform throughout the whole notch, indicating an “edge effect” on the extremities. This fact denotes that the final stopping angle estimate must be improved.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Esquema representativo dos diferentes tipos de mecânica à fratura (Modificada de ANDERSON, 2005) .....	9
Figura 2.2 -	Os três modos de fratura de uma trinca .....	10
Figura 2.3 -	Zona plástica na frente da trinca definida inicialmente por Irwin et. al (1958) e Irwin (1960) (Modificada de ANDERSON, 2005) .....	11
Figura 2.4 -	Relação entre $K_c$ e a espessura do corpo de prova (Modificada de MEDINA, 2014) .....	13
Figura 2.5 -	Geometria e dimensões do corpo de prova SE(B) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019) .....	13
Figura 2.6 -	Geometria e dimensões do corpo de prova C(T) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019) .....	14
Figura 2.7 -	Três tipos de curvas carga vs. deslocamento obtidas em um ensaio de tenacidade à fratura de acordo com a norma ASTM E399 (ASTM, 2019) (Modificada de ZHU e JOYCE, 2012) .....	15
Figura 2.8 -	Representação esquemática de um caminho escolhido no método Integral J (Modificada de LOPEZ, 2010) .....	17
Figura 2.9 -	Curva $J_R$ (Modificada de ANDERSON, 2005) .....	18
Figura 2.10 -	Uma trinca aguda se deformando plasticamente e dando origem a uma trinca arredondada, cuja abertura de ponta é $\delta$ (Modificada de ANDERSON, 2005) .....	19
Figura 2.11 -	Estimativa do CTOD a partir do deslocamento da trinca efetiva na zona plástica proposta inicialmente por Irwin (Modificada de ANDERSON, 2005) .....	20
Figura 2.12 -	Estimativa do CTOD por meio de Dugdale (Modificada de BURDEKIN; STONE, 1966) .....	20
Figura 2.13 -	Esquema básico do comportamento das tensões em um corpo de prova durante um ensaio SNTT (Modificada de WANG et al., 2008) .....	23
Figura 2.14 -	Comparação entre um corpo de prova C(T) e um corpo de prova SNTT (Modificada de WANG e LIU, 2008) .....	24

Figura 2.15 -	Modelo de simulação mostrando a origem do sistema de coordenadas fixada na ponta da trinca e os vetores unitários $u$ na direção de $x$ , $v$ na direção de $y$ e $w$ na direção de $z$ (Modificada de WANG et al., 2000) .....	25
Figura 2.16 -	Definição das dimensões do cilindro simulado por Wang et al. (2012) .....	26
Figura 2.17 -	Avaliação do crescimento da trinca no cilindro simulado, utilizando uma simulação em elementos finitos (WANG, 2019) .....	27
Figura 2.18 -	Evolução da complacência característica durante o crescimento da trinca no ensaio SNTT (WANG, 2019) .....	27
Figura 2.19 -	Evolução da taxa característica de liberação de energia durante o crescimento da trinca no ensaio SNTT (WANG, 2019) .....	28
Figura 3.1 -	Fluxograma do processo de pré-trinca por fadiga na aplicação do método SNTT .....	31
Figura 3.2 -	Diagrama de blocos representando o procedimento de cálculo de tenacidade à fratura pelo método SNTT .....	32
Figura 3.3 -	(a) Sistema de ensaio MTS 809; (b) Garras hidráulicas utilizadas para fixação dos corpos de prova (CP) .....	33
Figura 3.4 -	Indicação da posição de retirada das amostras para verificação da direção de laminação da chapa de aço AISI 4340 com direções ainda desconhecidas .....	34
Figura 3.5 -	Geometria e dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração .....	36
Figura 3.6 -	Representação gráfica da relação entre $a/D$ e o passo do entalhe para corpos de prova SNTT .....	37
Figura 3.7 -	Desenho técnico do corpo de prova SNTT projetado .....	38
Figura 3.8 -	Desenho técnico do corte transversal da seção útil do corpo de prova SNTT .....	38
Figura 3.9 -	Desenho técnico do corte transversal da seção útil do corpo de prova SNTT com $a_e/D$ igual a 0,116 .....	38
Figura 3.10 -	Esquema representativo da retirada das barras cilíndricas para fabricação dos corpos de prova de SNTT .....	39
Figura 3.11 -	Marcação indicando o comprimento do corpo de prova que deve ser fixado pelas garras .....	40
Figura 3.12 -	Corpo de prova SNTT posicionado no sistema de ensaio, com o extensômetro acoplado .....	41
Figura 3.13 -	Esquema representativo da do corte do corpo de prova de AISI 4340 para análise no MEV .....	42
Figura 3.14 -	Corpo de prova (CP) com Roseta colada no centro do entalhe .....	43

Figura 3.15 - Geometria e dimensões do corpo de prova C(T) para uma espessura $B$ igual a 25,4 mm .....	45
Figura 3.16 - Esquema representativo da retirada dos blocos para fabricação dos corpos de prova C(T) .....	45
Figura 3.17 - Desenho técnico das facas seguindo as recomendações da norma ASTM E399 (ASTM, 2019) .....	46
Figura 3.18 - Facas (1), corpo de prova C(T) (2), extensômetro acoplado ao corpo de prova (3) e garras de fixação (4) .....	47
Figura 3.19 - Corpo de prova C(T) com a região próxima ao entalhe polida e com a marcação que representa $a/W$ igual a 0,55 .....	47
Figura 3.20 - Esquema representativo da medição do comprimento da pré-trinca por fadiga na superfície exposta dos corpos de prova C(T) .....	48
Figura 3.21 - Posicionamento da origem do sistema de coordenadas para as medições do corpo de prova C(T) com a MMC .....	50
Figura 3.22 - Posicionamento do ponto central da tela de medição do projetor de perfil para a medição do passo do entalhe .....	51
Figura 3.23 - Perfil do entalhe do corpo de prova SNTT obtido por interferometria a laser indicando o procedimento de medição .....	51
Figura 3.24 - Aplicação do método SNTT .....	55
Figura 3.25 - Procedimento de determinação do passo do entalhe do corpo de prova ....	55
Figura 4.1 - Microestrutura nas 3 faces da amostra do AISI 4340 como recebido .....	59
Figura 4.2 - Imagens da microestrutura do material (a) sem bandeamento químico aparente ou inclusões achatadas; (b) claro bandeamento químico caracterizado pela coloração branca .....	60
Figura 4.3 - Curva $\theta_{RVDT}$ versus $\theta_{extens.}$ obtida no ensaio preliminar .....	61
Figura 4.4 - Curva $\theta_{extens.}$ versus $T$ obtida no ensaio preliminar .....	62
Figura 4.5 - Corpo de prova SNTT fraturado após o carregamento monotônico .....	63
Figura 4.6 - Curvas Torque versus $\theta_{CP}$ para os corpos de prova SNTT (CPs) .....	63
Figura 4.7 - Composição de imagens da superfície de fratura de um corpo de prova SNTT .....	65
Figura 4.8 - Imagem da pré-trinca em um ângulo diferente .....	66
Figura 4.9 - Imagem do crescimento da pré-trinca além da superfície de fratura, acompanhando o entalhe do corpo de prova SNTT .....	67
Figura 4.10 - Ampliação da região na qual há o final da pré-trinca ao longo do entalhe ..	67
Figura 4.11 - Transição entre as regiões de pré-trinca e fratura abrupta de um corpo de prova SNTT de AISI 4340 ensaiado .....	68

Figura 4.12 - Região de pré-trinca de um corpo de prova SNTT .....	69
Figura 4.13 - Região da fratura frágil de um corpo de prova SNTT próxima à transição pré-trinca/fratura frágil, indicando claramente a presença de <i>dimples</i> .....	69
Figura 4.14 - Região da fratura frágil de um corpo de prova SNTT .....	70
Figura 4.15 - Imagens da pré-trinca em duas seções de corte a 45° além da região de fratura de um corpo de prova SNTT .....	71
Figura 4.16 - Imagem da pré-trinca em uma seção de corte a 45° próxima à extremidade do entalhe de um corpo de prova SNTT .....	72
Figura 4.17 - Imagem da pré-trinca se propagando ao longo dos contornos dos antigos grãos austeníticos .....	72
Figura 4.18 - Curvas Torque <i>versus</i> Ângulo de torção do extensômetro para os corpos de prova do ensaio definitivo e preliminar .....	73
Figura 4.19 - Curvas Torque <i>versus</i> Ângulo de torção dos <i>strain gages</i> para os corpos de prova do ensaio definitivo e preliminar .....	74
Figura 4.20 - Curvas Torque <i>versus</i> Ângulo de torção do extensômetro e do <i>strain gage</i> para o corpo de prova do ensaio preliminar .....	75
Figura 4.21 - Curvas Torque <i>versus</i> Ângulo de torção do extensômetro e do <i>strain gage</i> para o corpo de prova do ensaio definitivo .....	75
Figura 4.22 - Crescimento da pré-trinca nos corpos de prova C(T) .....	76
Figura 4.23 - Valor médio de $K_{IC}$ para o aço AISI 4340 em função do método, com barra de erros indicando o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 % .....	79
Figura 4.24 - <i>Box plot</i> referente aos valores de $K_{IC}$ em função dos métodos avaliados ...	80
Figura 4.25 - Gráfico de resíduos x valores observados de $K_{IC}$ .....	81
Figura 4.26 - Gráfico de resíduos x valores preditos de $K_{IC}$ .....	81
Figura 4.27 - Gráfico de valores preditos x valores observados de $K_{IC}$ .....	82
Figura 4.28 - Superfícies de fratura observadas nos corpos de prova SNTT e C(T) em uma região próxima à pré-trinca .....	83
Figura 4.29 - Superfícies de fratura observadas nos corpos de prova SNTT e C(T) em uma região longe da pré-trinca .....	84
Figura 4.30 - Gráfico de barras indicando o percentual que o desvio padrão representa em relação ao valor médio do $K_{IC}$ , para os trabalhos citados na Tab. 4.10	86
Figura 4.31 - Gráfico de barras indicando os valores médios para os resultados obtidos nesse trabalho e por Li et. al (2018) .....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros aplicados para abertura da pré-trinca dos corpos de prova de aço AISI 4340 .....	41
Tabela 3.2 - Matriz de planejamento fatorial simples .....	43
Tabela 3.3 - Sistemas de medição utilizados na medição dos diversos mensurandos..	49
Tabela 3.4 - Modelos matemáticos para avaliação da incerteza associada aos mensurando avaliados durante o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova .....	52
Tabela 3.5 - Modelos matemáticos das variáveis de entradas (mensurandos) para determinação da tenacidade à fratura .....	54
Tabela 4.1 - Resultados da análise da composição química do AISI 4340 .....	59
Tabela 4.2 - Valores de dureza obtidos após o tratamento térmico do AISI 4340 utilizado para fabricação dos corpos de prova dos ensaios de tração .....	60
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de tração para o aço AISI 4340 com 45,7 HRC ..	61
Tabela 4.4 - Valores médios de dureza para as três amostras avaliadas. Incerteza expandida associada para uma probabilidade de 95 % .....	62
Tabela 4.5 - Valores de torque e de $\theta_{CP}$ no momento da fratura para os três corpos de prova SNTT .....	64
Tabela 4.6 - Valores médios do comprimento de pré-trinca para os três corpos de prova SNTT .....	64
Tabela 4.7 - Valores de $K_{IC}$ e de incerteza expandida obtidos para os corpos de prova SNTT .....	65
Tabela 4.8 - Medições dos comprimentos de pré-trinca dos corpos de prova C(T) ensaiados .....	77
Tabela 4.9 - Comprimentos totais trinca dos corpos de prova C(T) ensaiados .....	77
Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios nos corpos de prova C(T) .....	78
Tabela 4.11 - Resultados da ANOVA para planejamento simples proposto para determinação do valor de $K_{IC}$ .....	80
Tabela 4.12 - Resultados do teste U de Mann-Whitney para o planejamento simples proposto para determinação do valor de $K_{IC}$ .....	82

Tabela 4.13 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com Wang et. al (2008) .....	85
Tabela 4.14 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles oriundos de outras pesquisas realizadas por outros autores .....	85

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

**Lista de símbolos:**

<i>A</i>	Área da seção transversal
<i>a</i>	Comprimento da trinca
<i>a<sub>e</sub></i>	Profundidade do entalhe
<i>a<sub>pt</sub></i>	Comprimento da pré-trinca
<i>a<sub>0</sub></i>	Comprimento da trinca inicial
<i>B</i>	Espessura do corpo de prova
<i>C<sub>1</sub></i>	Comprimento maior
<i>C<sub>2</sub></i>	Comprimento menor
<i>CP</i>	Corpo de prova
<i>D</i>	Diâmetro do corpo de prova
<i>D<sub>g1</sub></i>	Diâmetro da cabeça de fixação 1
<i>D<sub>g2</sub></i>	Diâmetro da cabeça de fixação 2
<i>Dist.</i>	Distância entre os furos
<i>E</i>	Módulo de elasticidade
<i>f<sub>ij</sub> (θ)</i>	Funções angulares para tensão
<i>F<sub>1</sub></i>	Diâmetro do furo 1
<i>F<sub>2</sub></i>	Diâmetro do furo 2
<i>f(a/W)</i>	Função geometria
<i>G</i>	Taxa de liberação de energia
<i>h</i>	Altura do cilindro simulado
<i>J</i>	Integral-J
<i>J<sub>IC</sub></i>	Tenacidade à fratura de iniciação elastoplástica
<i>J<sub>pl</sub></i>	Componente plástico da integral J
<i>k</i>	Fator de abrangência
<i>K</i>	Fator de intensidade de tensão
<i>K<sub>c</sub></i>	Fator de intensidade de tensão crítico
<i>K<sub>I</sub></i>	Fator de intensidade de tensão do modo I
<i>K<sub>II</sub></i>	Fator de intensidade de tensão do modo II
<i>K<sub>III</sub></i>	Fator de intensidade de tensão do modo III

$K_{IC}$	Tenacidade à fratura no estado plano de deformação
$K_{máx}$	Fator de intensidade de tensão máximo
$K_{min}$	Fator de intensidade de tensão mínimo
$K_Q$	Tenacidade à fratura condicional
$L$	Comprimento do cilindro simulado
$m$	Função do tamanho da trinca e propriedades do material
$M$	Mensurando
$\bar{n}$	Vetor normal ao contorno
$p$	Passo do entalhe
$P_{máx}$	Força máxima aplicada
$P_Q$	Força a secante de 5 %
$R$	Razão de fadiga
$R^2$	Coeficiente de correlação
$r$	Raio de arredondamento na ponta da trinca
$r_y$	Tamanho da zona plástica na frente da ponta da trinca
$s$	Comprimento do caminho escolhido
$s(x)$	Desvio padrão da variável x
$t$	Espessura
$T$	Torque aplicado
$T_{estimado}$	Torque estimado
$T_{máx}$	Torque máximo do ciclo de fadiga
$T_{min}$	Torque mínimo do ciclo de fadiga
$\bar{T}$	Vetor tensão
$u_c(y)$	Incerteza-padrão combinada da variável y
$\bar{u}$	Vetor deslocamento na direção x
$U$	Incerteza expandida
$U(x)$	Incerteza expandida da variável x
$u(x)$	Incerteza-padrão da variável x
$W$	Largura do corpo de prova
$\bar{X}$	Média aritmética dos valores obtidos durante a medição

### **Lista de símbolos gregos:**

$\Delta A$	Correção devido à ampliação da objetiva utilizada
$\Delta C$	Correção devido à calibração do sistema de medição
$\Delta DP$	Correção devido ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição

$\Delta DPF$	Correção devido ao desvio de planeza da superfície do batente
$\Delta DPM$	Correção devido ao desvio de planeza da superfície do fuso
$\Delta E_a$	Correção devido ao erro de apalpamento
$\Delta K$	Variação do fator de intensidade de tensão
$\Delta R$	Correção devida à resolução do sistema de medição
$\sigma$	Tensão remota atuante
$\sigma_{ys}$	Limite de escoamento
$\delta$	Abertura da ponta da trinca
$\nu$	Coeficiente de Poisson
$\varepsilon_{45^\circ}$	Deformação a 45°
$\Gamma$	Contorno escolhido
$\mu$	Módulo de cisalhamento
$\theta$	Ângulo de torção associado
$\theta_{cilindro}$	Ângulo de torção do cilindro simulado
$\theta_{CP}$	Ângulo de torção do corpo de prova
$\theta_{extens}$	Ângulo de torção do corpo de prova medido pelo extensômetro
$\theta_{final}$	Ângulo de torção de parada da abertura da pré-trinca
$\theta_{final\_calc}$	Ângulo de torção de parada da abertura da pré-trinca calculado
$\theta_{final\_exp}$	Ângulo de torção de parada da abertura da pré-trinca obtido empiricamente
$\theta_h$	Ângulo do passo do entalhe
$\theta_{RVDT}$	Ângulo de torção do corpo de prova medido pelo RVDT
$\gamma$	Ângulo de deformação unitário característico

### **Lista de siglas e abreviaturas:**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Standard for Testing and Materials</i>
A(B)	Flexão em forma de arco
A(T)	Tração em forma de arco
C(T)	Compacto de tração
CTOA	<i>Crack Tip Opening Angle</i>
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
DC(T)	Compacto de tração circular

FEG	<i>Field Emission Gun</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MFEP	Mecânica da Fratura Elastoplástica
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas
NBR	Norma Técnica
RVDT	<i>Rotary Variable Differential Transformer</i>
SEN(B)	Flexão a três pontos
SNTT	<i>Spiral Notch Torsion Test</i>
SNTT	Teste de Torção em Entalhe Helicoidal
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo principal .....	2
1.2	Objetivos secundários .....	2
1.3	Justificativa .....	3
1.4	Contribuição técnico-científica do trabalho .....	4
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1	Mecânica da Fratura .....	6
2.1.1	<i>Fator de intensidade de tensão K .....</i>	9
2.1.2	<i>Integral J .....</i>	16
2.1.3	<i>CTOD .....</i>	19
2.2	Teste de Torção em Entalhe Helicoidal .....	22
2.2.1	<i>Equações analíticas do ensaio SNTT .....</i>	24
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>28</b>
3.1	Desenvolvimento da metodologia do ensaio SNTT .....	28
3.1.1	<i>Procedimento de abertura de pré-trinca por fadiga .....</i>	29
3.1.2	<i>Procedimento de determinação da tenacidade à fratura .....</i>	31
3.2	Aplicação da metodologia proposta para avaliação da tenacidade à fratura por meio do método SNTT .....	32
3.2.1	<i>Caracterização do aço AISI 4340 .....</i>	34
3.2.2	<i>Fabricação dos corpos de prova SNTT .....</i>	36
3.2.3	<i>Ensaios com corpos de prova SNTT .....</i>	39

3.2.4 <i>Medição da deformação dos corpos de prova via extensômetro “Strain gages”</i> .....	42
<b>3.3 Validação da metodologia proposta .....</b>	<b>43</b>
3.3.1 <i>Obtenção dos valores de referência por meio do método convencional – corpos de prova C(T)</i> .....	44
<b>3.4 Controle dimensional e geométrica dos corpos de prova .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5 Avaliação da incerteza de medição .....</b>	<b>52</b>
3.5.1 <i>Avaliação da incerteza expandida à <math>K_{IC}</math> determinado pelo método SNTT</i> .....	53
<b>3.6 Detalhadamento da metodologia proposta .....</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO IV RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
<b>4.1 Resultados da caracterização do material .....</b>	<b>58</b>
4.1.1 <i>Análise da composição química</i> .....	58
4.1.2 <i>Direção de laminação</i> .....	59
4.1.3 <i>Propriedades mecânicas</i> .....	60
<b>4.2 Ensaio Preliminar .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3 Ensaios definitivos nos corpos de prova SNTT .....</b>	<b>62</b>
4.3.1 <i>Resultados dos ensaios SNTT</i> .....	62
4.3.2 <i>Análise da superfície de fratura dos corpos de prova SNTT</i> .....	65
4.3.3 <i>Resultados das medições com os extensômetros - strain gages</i> .....	73
<b>4.4 Validação da metodologia proposta .....</b>	<b>76</b>
<b>4.5 Comparação dos resultados dos métodos SNTT e convencional .....</b>	<b>78</b>
<b>4.6 Comparação dos resultados com a literatura .....</b>	<b>84</b>
<b>CAPÍTULO V CONCLUSÕES .....</b>	<b>88</b>
<b>CAPÍTULO VI PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>90</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO A Certificado de Calibração do Paquímetro Digital .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO B Certificado de Calibração do Projetor de Perfil .....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXO C Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas .....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXO D Certificado de Calibração do Micrômetro Digital .....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO E Certificado de Calibração do Interferômetro Laser .....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO F Certificado de Calibração do Termo-higrômetro .....</b>	<b>110</b>
<b>APÊNDICE I Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova C(T) .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE II Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova SNTT .....</b>	<b>114</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A Mecânica da Fratura Elástica Linear é responsável por estudar o comportamento de componentes que contêm em sua estrutura defeitos ou trincas e que, quando submetidos a esforços de serviço, fraturam drasticamente. A resistência dos materiais, em seus conceitos tradicionais, considera a tenacidade à fratura uma propriedade que indica a capacidade que o material possui de resistir à propagação de uma trinca. Portanto, a mecânica da fratura, por meio dessa e outras propriedades dos materiais, juntamente com a forma e as dimensões dos defeitos presentes e as tensões atuantes, busca estimar a vida útil de um componente simulando as condições de serviço aplicadas a ele.

Ao longo dos anos, várias técnicas de medição e métodos para estimar a tenacidade à fratura foram desenvolvidos. A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) trata exclusivamente da obtenção do fator de intensidade de tensão,  $K_{IC}$ , no estado plano de deformação, sendo considerado uma propriedade intrínseca do material para as condições, nas quais o ensaio foi realizado. Para tanto, diferentes geometrias de corpos de prova são utilizadas, dentre elas destaca-se o do tipo compacto em tração (C(T)) e o de flexão a três pontos (SEN(B)), que são capazes de fornecer os valores de tenacidade à fratura. Apesar destas geometrias serem padronizadas pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019), elas possuem limitações significativas, principalmente no que se refere às dimensões dos corpos de prova. Essas dimensões são definidas em função das propriedades mecânicas do material (limite de escoamento, ductilidade e a própria tenacidade à fratura), objetivando a garantia da obtenção de um valor de tenacidade à fratura em um domínio de estado plano de deformação (estado triaxial de tensão). Dessa forma, para materiais com baixo limite de escoamento e muito tenazes, os corpos de prova podem ter dimensões significativas, o que exige uma quantidade

considerável de material para ensaio e o uso de máquinas de ensaio de elevada capacidade, por vezes superior à capacidade das máquinas de ensaio atualmente presentes no mercado.

Com o objetivo de sanar as dificuldades para determinação de  $K_{IC}$ , apresentadas pelo método abordado na norma ASTM E399 (ASTM, 2019), ao longo das últimas décadas, pesquisadores têm desenvolvido métodos alternativos para obtenção desta propriedade tão importante para o projeto de componentes e estruturas de engenharia. Dentre esses métodos, o chamado *Spiral Notch Torsion Test* (SNTT) ou em português Teste de Torção de Entalhe Helicoidal, tem ganhado destaque devido ao fato de postular independência da tenacidade à fratura com relação às dimensões do corpo de prova.

O SNTT pode ser conceituado como o ensaio no qual aplica-se um torque na extremidade do corpo de prova submetendo-o por completo a forças de cisalhamento, que neste caso, são uniformes ao longo de todo o comprimento deste (WANG e LIU, 2004). O corpo de prova cilíndrico requerido pelo método SNTT possui uma linha de entalhe que gira em torno deste, sob um ângulo de passo de 45°. Desta forma, quando submetido a uma torção pura, há, consequentemente, a garantia de tensões puramente de tração (modo I de carregamento) ao longo da frente da trinca no entalhe helicoidal. Uma significativa vantagem do método SNTT é a possibilidade de utilizar corpos de prova com dimensões significativamente menores do que aquelas necessárias para obtenção da tenacidade à fratura segundo as normas internacionais existentes.

## 1.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho foi descrever de forma detalhada e validar experimentalmente a metodologia para a abertura de pré-trinca por fadiga e para a determinação da tenacidade à fratura,  $K_{IC}$ , aplicando o método SNTT.

## 1.2 Objetivos secundários

- a) Determinar a tenacidade à fratura,  $K_{IC}$ , do aço AISI 4340 temperado e revenido, utilizando o método SNTT, e comparando os resultados com os obtidos conforme norma ASTM E399.
- b) Avaliar a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida por meio do teste SNTT.

### 1.3 Justificativa

Os métodos normatizados para a determinação da tenacidade à fratura, dependendo da tenacidade do material, podem ser impossível de serem executados dada a impossibilidade da execução de corpos de prova que atendam às exigências dimensionais prescritas nestas normas que devem ser suficientes para garantir a dominância do estado plano de deformação na frente da trinca (WANG e LIU, 2004). Se os corpos de prova normatizados não atenderem aos critérios dimensionais especificados na norma ASTM E399 (ASTM, 2019), tanto a precisão quanto a confiabilidade dos valores de  $K_{IC}$  podem ser questionados (WANG, 2019).

De acordo com a norma ASTM E399 (ASTM, 2019), para definir as dimensões dos corpos de prova, devem ser conhecidos o limite de escoamento ( $\sigma_y$ ) e a resistência mecânica do material, bem como os valores previstos da tenacidade à fratura deste. Como alternativa, a norma ASTM E399 (ASTM, 2019) recomenda a razão entre a resistência ao escoamento e o módulo de elasticidade para selecionar um corpo de prova com dimensões adequadas. Quando a tenacidade à fratura é elevada, a espessura e o ligamento do corpo de prova crescem proporcionalmente ao quadrado da relação  $K_{IC}/\sigma_y$ . Tal fato, no caso de alguns materiais, torna inviável a determinação da tenacidade à fratura em condições de dominância de um estado plano de deformação. Além disso, esses métodos normatizados se baseiam na aplicação de esforços que não se distribuem uniformemente ao longo do comprimento do corpo de prova, levando a índices de confiabilidade significativamente baixos para a determinação da tenacidade à fratura.

O teste de torção de entalhe helicoidal possibilita a aplicação de uma torção pura, a qual se distribui de maneira uniforme ao longo de todo o corpo de prova. Wang e Liu (2004) afirmam que as dimensões dos corpos de prova não exercem influência significativa nas propriedades mecânicas do material testado.

Wang e Liu (2004) inferiram que a incerteza associada ao  $K_{IC}$  fornecido pelo método SNTT deveria ser menor que a incerteza associada aos resultados obtidos pelo método convencional. Os autores tomaram como base para essa afirmação as longas frentes de trinca e o estado plano de deformação observados. Entretanto, não foi declarada a incerteza associada e, consequentemente, os valores de  $K_{IC}$  não são rastreáveis metrologicamente.

A declaração da incerteza de medição é tão importante quanto a apresentação do resultado de medição em si (DÉSEFANT e PRIEL, 2017). A comparação entre medições diferentes de um mesmo mensurando, bem como entre um resultado de medição e um valor limite específico são impossíveis de serem realizadas sem que a incerteza seja determinada (BIPM et al, 2008).

Apesar dos esforços dedicados, estudos mais aprofundados devem ser conduzidos considerando os seguintes aspectos: não foi encontrada na literatura estudada, uma metodologia detalhada para a determinação da tenacidade à fratura usando o método SNTT; os trabalhos publicados após a criação do método não são claros, dificultando assim a reproduzibilidade do teste; e os valores de  $K_{IC}$  obtidos usando o método SNTT não são rastreáveis.

#### 1.4 Contribuição técnico-científica do trabalho

Os resultados obtidos neste trabalho ampliam o estado atual de conhecimento para a obtenção da tenacidade à fratura de materiais por meio da aplicação do método SNTT, que dificilmente seriam obtidas aplicando o método convencional:

- Formalização de uma metodologia geral que possibilite a obtenção de valores de tenacidade à fratura via ensaios SNTT com repetibilidade e reproduzibilidade adequadas ao nível de exatidão requerido por estes. O entendimento e aplicação deste método apresentam limitações significativas, pois não se dispõe de uma metodologia detalhadamente documentada sobre este ensaio. Ainda, os trabalhos publicados posteriormente à criação do método carecem de clareza e em muitos casos tornam difícil a reprodução do ensaio;
- Padronização para as dimensões e a geometria dos corpos de prova SNTT. A literatura estudada não fornece de forma clara como as dimensões e a geometria do corpo de prova foram definidas para o atendimento das equações de flexibilidade elástica. Esta prática visa melhorar a repetibilidade dos resultados do ensaio, bem como realizar comparações interlaboratoriais a nível nacional e internacional;
- Um procedimento para avaliação da incerteza de medição associada à tenacidade à fratura visando contribuir para a rastreabilidade dos resultados do ensaio, bem como para atender requisitos técnicos da NBR/ISO IEC 17025 (ABNT, 2017).

Para melhor compreensão do processo de estudo e pesquisa, este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo II, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto dando ênfase na mecânica da fratura, no teste convencional de medição da tenacidade à fratura e o princípio de desenvolvimento do método SNTT.

No Capítulo III, é apresentado detalhadamente o desenvolvimento das metodologias para determinação da tenacidade à fratura e acompanhamento do processo de abertura de

pré-trinca por meio do método SNTT e o segundo a norma ASTM E399. O procedimento para avaliação da incerteza de medição associada à tenacidade a fratura também é apresentado, bem como os testes experimentais propostos para o desenvolvimento do trabalho, quais sejam: testes experimentais para validação das metodologias propostas.

No Capítulo IV, apresentam-se os resultados obtidos acompanhados das respectivas discussões.

No Capítulo V, se encontram as principais conclusões do trabalho.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a revisão bibliográfica dos tópicos necessários para desenvolvimento do trabalho, sendo eles: mecânica da fratura e teste de torção em entalhe helicoidal.

#### 2.1 Mecânica da Fratura

A ocorrência de fraturas vem sendo um obstáculo relutante para a humanidade desde o momento em que o ser humano começou a construir estruturas e usá-las em seu dia-a-dia. À medida que a tecnologia se desenvolve, essa dificuldade aumenta gradualmente, pois tecnologias mais complexas implicam, consequentemente, em fraturas e comportamentos estruturais mais difíceis de serem previstos. De acordo com Anderson (2005), um estudo econômico estimou que em 1978 o custo oriundo de fraturas nas estruturas fabricadas nos Estados Unidos era de \$119 bilhões de dólares, o que naquela época correspondia a aproximadamente 4 % do produto interno bruto do país. Esse mesmo estudo mostrou, portanto, que somente com os estudos existentes sobre a mecânica da fratura, seria possível minimizar o valor de custo com fraturas em \$28 bilhões.

Duas causas podem ser citadas como as responsáveis pela maioria das fraturas estruturais (ANDERSON, 2005): negligência durante o projeto, construção ou operação da estrutura; e aplicação de um processo ou material novo, o que implica em comportamentos imprevisíveis ou até mesmo indesejáveis.

A primeira causa é frequente, tendo em vista que existem alguns processos de fabricação, que são muito complexos e que facilmente resultam em microestruturas não previstas nos componentes fabricados. Além disso, as simulações durante o projeto e

construção das estruturas nem sempre conseguem reproduzir de forma completa as condições de serviço. Em muitos casos, parte-se de pressupostos e aproximações que podem implicar em erros. Já a segunda causa tem se tornado habitual, pois a inovação tecnológica e o desenvolvimento de novos materiais têm propiciado comportamentos estruturais que são complexos e difíceis de serem estimados.

Tendo em vista o elevado número de falhas estruturais devido a fratura do material, a ciência da mecânica da fratura se desenvolveu ao longo do último século, objetivando estudar o comportamento das fraturas. Esse estudo se dá, principalmente, em função da tenacidade à fratura, uma importante propriedade mecânica do material. Essa propriedade pode ser conceituada, de forma geral, como sendo a resistência do material à propagação de uma trinca. Foi por meio da determinação experimental da tenacidade à fratura que os métodos utilizados na mecânica da fratura se desenvolveram, alicerçados na avaliação da integridade estrutural e na definição de tolerâncias de projeto para os danos estruturais.

Ao longo do desenvolvimento da mecânica da fratura, diferentes parâmetros foram criados para estimar a tenacidade à fratura do material, quais sejam o fator de intensidade de tensão ( $K$ ), a integral- $J$  e o deslocamento de abertura na ponta da trinca ( $CTOD$ ).

Irwin (1957) propôs o primeiro conceito do fator  $K$  como sendo o parâmetro que é capaz de descrever a intensidade dos campos elásticos desenvolvidos na ponta de uma trinca, e sua utilização simboliza a mecânica da fratura linear. A integral- $J$  foi proposta por Rice (1968) e, diferentemente do que Irwin (1957) propôs, esse parâmetro descreve a intensidade dos campos elastoplásticos que se desenvolvem na ponta de uma trinca. Esse conceito está diretamente relacionado à mecânica da fratura elastoplástica. Wells (1963) foi o primeiro a propor o conceito do  $CTOD$ , o qual é normalmente utilizado como parâmetro de fratura, e em prática, pode ser utilizado como um correspondente do fator  $K$  ou da integral- $J$ . Métodos experimentais distintos foram desenvolvidos para cada um desses parâmetros capazes de descrever a tenacidade à fratura.

Zhu, e Joyce, (2012), afirmam que o desempenho do material durante a realização de um ensaio de tenacidade à fratura depende de três fatores do material: o comportamento de fratura, o comportamento da deformação e o efeito da restrição da geometria.

O comportamento de fratura remete aos micro-mecanismos de fratura que o material pode possuir, sendo normalmente descritos como frágil ou dúctil. Uma fratura considerada frágil é identificada por uma separação normal à tensão de aplicação e sua superfície é lisa com quase nenhuma deformação plástica macroscópica e pouca microdeformação. Nesse tipo de fratura, na ponta da trinca há o desenvolvimento de uma zona de deformação elástica linear, e a tenacidade de iniciação da trinca domina a resistência à fratura do material, com apenas uma pequena contribuição da resistência à propagação da trinca além da iniciação. Em geral, a quantidade de energia que se faz necessária para propagar a trinca além de sua

iniciação é baixa, levando à uma falha instável e instantânea. Dessa forma, a tenacidade medida é, normalmente, um valor pontual e caracterizado pelo fator  $K$  ou pela taxa de liberação de energia  $G$  no início da trinca. O primeiro método de determinar valores do fator de intensidade de tensão em um estado plano de deformação para pontos no início ou próximo do início da trinca ( $K_{IC}$ ) é descrito pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019).

A fratura dúctil é caracterizada pela propagação da trinca devido ao crescimento e coalescência de microvazios. Durante esse processo, uma maior quantidade de energia é absorvida, resultando em uma extensão de trinca lenta e estável. Diferentemente do observado na fratura frágil, a dominância na ponta da trinca deixa de ser elástica e passa a ser plástica. Em resumo, a resistência do material à fratura se eleva à proporção que há o crescimento da trinca. Consequentemente, a tenacidade descrita não é pontual e sim uma curva de resistência, denominada curva -  $R$ , a qual pode ser avaliada tanto pela integral- $J$  quanto pelo  $CTOD$  ( $\delta$ ).

A integral- $J$  quantifica uma energia elástica não-linear, e seu uso para determinar a tenacidade à fratura elastoplástica requer cuidados. Normalmente, uma curva  $J-R$  é construída, representando a resistência do material à propagação estável da trinca em termos de  $J$ . A norma ASTM E1820 (ASTM, 2018) foi desenvolvida com o objetivo de regulamentar a determinação das curvas de tenacidade de iniciação elastoplástica ( $J_{IC}$ ), assim como a curva  $J-R$ . A norma ASTM E1290 (ASTM, 2013) foi desenvolvida para avaliar o  $CTOD$ .

Outro fator para analisar o desempenho do material em um teste de tenacidade à fratura é o comportamento da resistência e deformação do material, o qual pode ser caracterizado como elástico linear, elástico não linear ou elastoplástico. Normalmente, esse comportamento é de suma importância na determinação de qual método de teste de fratura deve ser adotado, e consequentemente, qual parâmetro para descrever a tenacidade do material será utilizado.

O uso desses métodos da mecânica da fratura, além de outros aqui não citados, como  $CTOA$ , permite a utilização da tenacidade à fratura como um parâmetro de projeto para um componente mecânico ou estrutural. Porém, as dimensões dos corpos de prova dos testes podem influenciar fortemente as condições de tensão na ponta da trinca, resultando em valores equivocados (ZHU e JOYCE, 2012). O que acontece é que, caso haja elevada restrição geométrica, as tensões atuantes na ponta da trinca são mais altas o que pode promover uma fratura mais frágil, ou, ainda, diminuir a área sob a curva de tenacidade à fratura dúctil do material. Por outro lado, caso haja baixa restrição, menores tensões podem ser observadas na ponta da trinca, o que tende a minimizar a possibilidade de ocorrer fratura frágil, bem como, aumentar a área sob a curva de tenacidade à fratura dúctil do material.

Essa restrição geométrica, geralmente, é especificada em função do estado de tensão que esta gera na ponta da trinca, quais sejam, plano de deformação ou plano de tensão, sendo o primeiro aquele com menor valor de tenacidade à fratura associado. Normalmente, a

fim de reduzir os efeitos das dimensões do corpo de prova, as normas ASTM E399 (ASTM, 2019) e ASTM E1820 (ASTM, 2018) definem faixas limites para as dimensões da trinca inicial, ligamento e espessura.

Como mostra a Fig. 2.1, em estudos mais recentes, além da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) e da mecânica da fratura elastoplástica (MFEP), uma terceira abordagem foi desenvolvida. Essa nova abordagem inclui o tempo como uma das variáveis do processo de fratura, fazendo surgir a Mecânica da Fratura Dinâmica, a Mecânica da Fratura Viscoelástica e a Mecânica da Fratura Viscoplástica (ANDERSON, 2005).

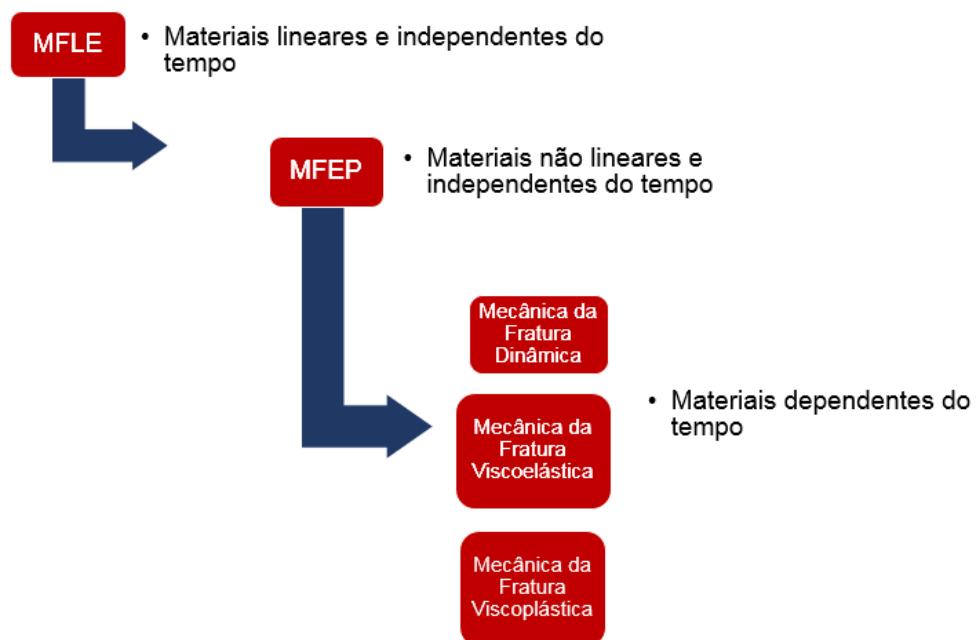


Figura 2.1 - Esquema representativo dos diferentes tipos de mecânica à fratura (Modificada de ANDERSON, 2005).

### 2.1.1 Fator de intensidade de tensão $K$

Os conceitos de mecânica da fratura precedentes ao ano de 1960 tratam apenas dos materiais que seguem a Lei de Hooke, ou seja, materiais chamados lineares e que se caracterizam como aqueles que falham de forma frágil, estabelecendo a MFLE. O parâmetro que é utilizado na MFLE para avaliar a tenacidade à fratura de materiais metálicos é o fator de intensidade de tensão,  $K$ .

De acordo com López (2010), Westergaard em 1927 definiu que para verificar as distribuições de tensões existentes na ponta de uma trinca deve-se dividir o modo com que as superfícies da trinca se movimentam em três tipos (Fig. 2.2). O modo I é caracterizado pela presença de deslocamentos locais na direção  $y$  que são simétricos em relação aos planos  $x$ - $y$  e  $x$ - $z$ , sendo ainda o mais frequente e fácil de simular em ensaios de laboratório. Já no modo

II, o deslocamento que ocorre é relativo entre as superfícies da fratura, ocorrendo ao longo do eixo  $x$  e é simétrico em relação ao plano  $x-y$  e assimétrico em relação ao plano  $x-z$ . O modo III, chamado de modo de torção, é caracterizado por deslocamentos locais na direção  $z$  e é assimétrico em relação aos planos  $x-y$  e  $x-z$ .

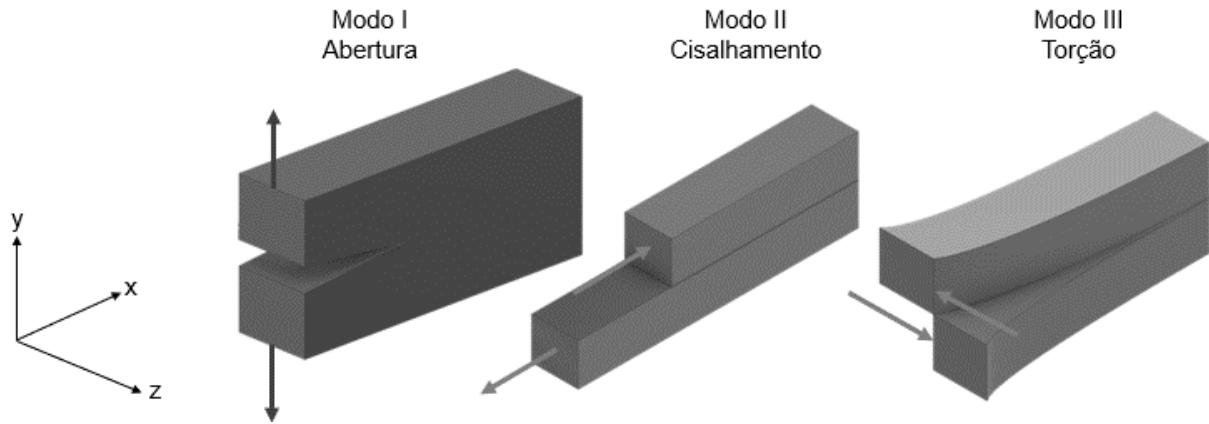


Figura 2.2 - Os três modos de fratura de uma trinca.

A cada um desses modos de fratura corresponde um campo de tensões diferente e, por consequência, um fator de intensidade de tensão  $K$  singular, conhecidos como  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$ , respectivamente para os modos I, II e III. Existem, porém, casos em que se pode tratar o campo de tensões na ponta da trinca em função de dois ou dos três tipos de modo de fratura, o chamado modo misto.

Irwin (1957) e Williams (1957) obtiveram um equacionamento capaz de relacionar o valor de  $K_I$  com o campo de tensão em uma trinca, considerando uma trinca ao longo da espessura e de comprimento  $2a$  localizada no meio de uma placa infinita submetida à uma tensão remota  $\sigma$ , como mostra a Eq. (2.1).

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1),  $i$  e  $j$  denotam as coordenadas retangulares  $x$  e  $y$  ou as coordenadas polares  $r$  e  $\theta$  considerando a origem na ponta da trinca,  $f_{ij}(\theta)$  são as funções angulares de tensão,  $r$  é distância da ponta da trinca e  $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ . O equacionamento de Williams (1957) considerava além do termo da Eq. (2.1), termos de ordem superior. Esse segundo termo foi denotado, a posteriori, como tensão-T. A Equação (2.1) indica o campo elástico localizado na ponta da trinca é singular, tendo em vista que à medida que  $r$  tende a zero, as tensões tendem ao infinito.

Entretanto, o que se observa na realidade é que não é possível obter tensões infinitas na ponta da trinca. Mesmo para materiais que possuem baixa capacidade de se deformar, pequenas deformações plásticas geradas na ponta da trinca, mantém as tensões finitas. Dessa forma, Irwin et al. (1958) e Irwin (1960) obtiveram uma estimativa para o tamanho da zona plástica localizada na frente da ponta da trinca ( $r_y$ ), como indica a Eq. (2.2) e ilustra a Fig. 2.3. Na Equação (2.2),  $\sigma_{ys}$  é o limite de escoamento do material.

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.2)$$

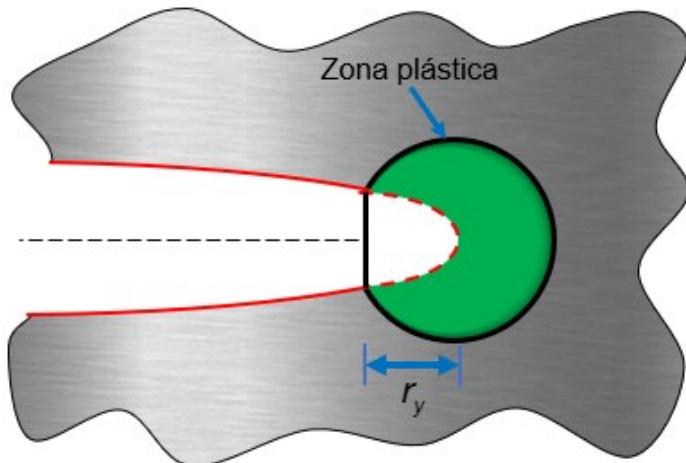


Figura 2.3 - Zona plástica na frente da trinca definida inicialmente por Irwin et. al (1958) e Irwin (1960) (Modificada de ANDERSON, 2005).

Vale ressaltar que a Eq. (2.2) é estritamente correta apenas para aqueles materiais que apresentam um comportamento com pequena escala de escoamento. Caso o material tenha comportamento plástico mais acentuado, o tamanho da zona plástica é maior, sendo aproximadamente o dobro de  $r_y$ .

Irwin (1957) definiu ainda, por meio das soluções por ele encontradas para o comportamento elástico de uma trinca e pela teoria da energia de Griffith (1920), uma relação entre  $K_{IC}$  e a taxa de liberação de energia elástica,  $G$ , como mostra a Eq. (2.3).

$$K = \sqrt{\frac{G.E}{(1-\nu^2)}} \quad (2.3)$$

Na Equação (2.3),  $E$  é o módulo de elasticidade e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do material.

As tensões ou deformações na ponta da trinca podem se elevar até um valor crítico. A partir desse valor,  $K_I$  passa a ser denominado  $K_C$  e a fratura do material pode ocorrer. Irwin et. al (1958) mostraram ainda que para um mesmo material, há uma dependência do valor de  $K_C$  com a espessura do corpo de prova. Essa dependência está diretamente relacionada às restrições de plasticidade que ocorrem na ponta da trinca. Sendo que, à medida que a espessura do corpo de prova aumenta, o valor de  $K_C$  diminui até atingir estabilidade, em função da predominância do estado plano de deformação. O ponto no qual ocorre essa estabilidade de  $K_C$  determina o  $K_{IC}$  do material, conhecido como tenacidade à fratura no estado plano de deformação para o modo I de fratura, como mostra a Fig. 2.4. Esse fator representa o valor mínimo de tenacidade que qualquer material possui, e por isso, é um parâmetro muito útil para projetos de componentes mecânicos e estruturais. Posteriormente, foi definido que para corpos de prova com pequenas espessuras, há a predominância do estado plano de tensão, e que para corpos de prova com espessuras maiores, há a predominância do estado plano de deformação.

Após todo o trabalho desenvolvido pelos estudiosos, principalmente Irwin, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), regulamentou normas para padronização da definição de  $K_{IC}$ , bem como métodos e corpos de prova para ensaios de determinação experimental do valor desse parâmetro.

A norma ASTM E1823 (ASTM, 2013) definiu, em sua primeira edição em 1996,  $K_{IC}$  como sendo a resistência à propagação de uma trinca quando um estado plano de deformação é verificado em modo I de falha. Ainda, as taxas de carregamento são baixas sobre uma predominância do comportamento linear elástico do material, não sendo necessária qualquer correção em relação à presença de uma zona plástica na frente da trinca. Entretanto, a norma que regulamenta o método de determinação de  $K_{IC}$ , a ASTM E399 (ASTM, 2019), foi pela primeira vez publicada ainda em 1972.

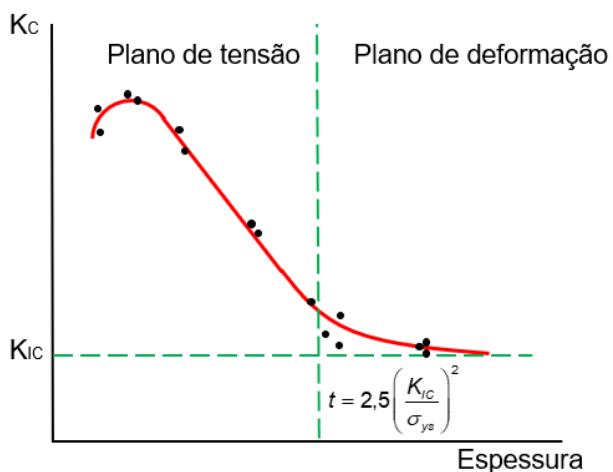


Figura 2.4 - Relação entre  $K_C$  e a espessura do corpo de prova (Modificada de MEDINA, 2014).

A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) aborda a adoção de cinco tipos de corpos de prova para determinar o valor de  $K_{IC}$  quais sejam: flexão a três pontos, SEN(B); compacto de tração, C(T); compacto de tração circular DC(T); tração em forma de arco, A(T); e flexão em forma de arco A(B). Os mais utilizados atualmente são o SEN(B) e o C(T), cujas geometrias são mostradas nas Figs. 2.5 e 2.6, respectivamente. A norma regulamente ainda que, prévio ao ensaio de tenacidade, é necessário a realização de um processo de abertura de pré-trinca por fadiga. Ao final desse processo, a relação entre a trinca inicial (comprimento do entalhe somado ao comprimento da pré-trinca aberta por fadiga) e a largura do corpo de prova ( $W$ ) deve permanecer entre 0,45 e 0,55.

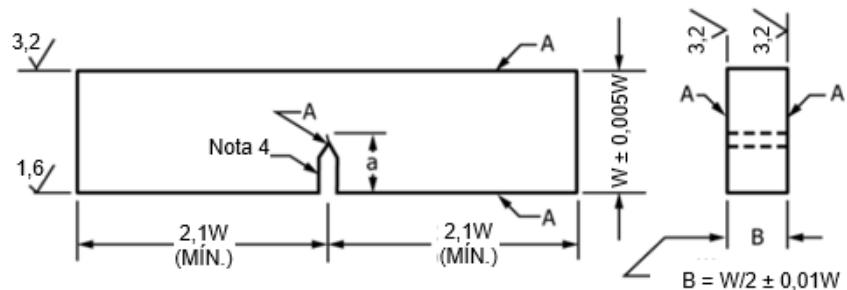


Figura 2.5 - Geometria e dimensões do corpo de prova SE(B) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019).

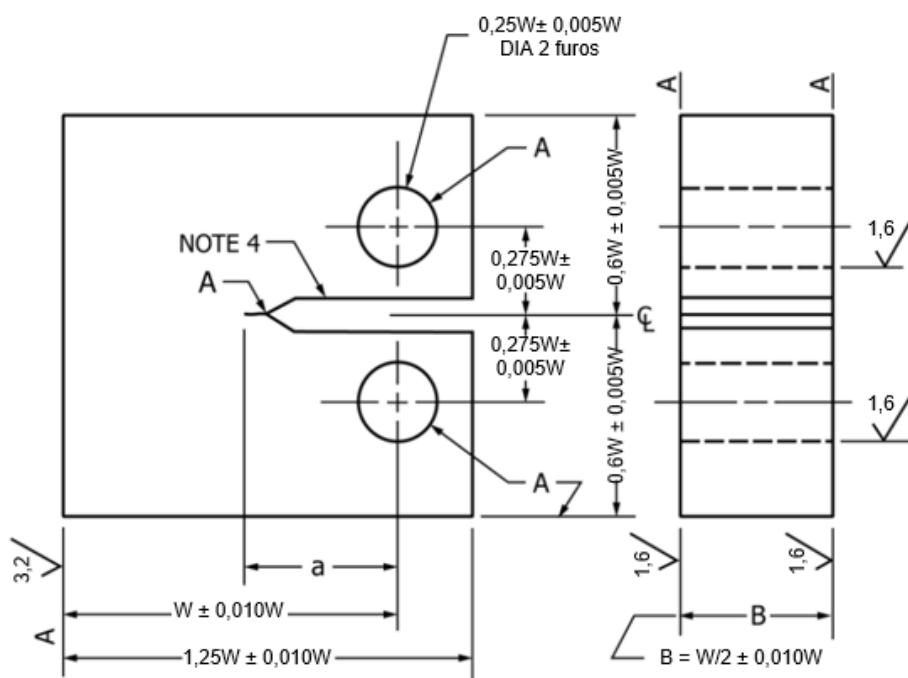


Figura 2.6 - Geometria e dimensões do corpo de prova C(T) definidas na norma ASTM E399 (Modificada de ASTM, 2019).

A Figura 2.7 mostra três tipos comuns de curvas de carga vs. deslocamento obtidos em ensaios seguindo a norma ASTM E399 (ASTM, 2019). É possível notar a definição de um parâmetro  $P_Q$  para cada um dos tipos por meio de uma secante a 5 % da linha que denota o comportamento linear do material. Essa linha secante a 5 % é utilizada, pois é por meio dela que se pode definir um  $K_{IC}$  com 2 % ou menos de propagação de trinca. No tipo I, o material desvia levemente da linearidade antes de atingir o máximo de carga ( $P_{\max}$ ), e nesse tipo  $P_Q$  é igual à carga em que a secante a 5 % toca a curva. Para o tipo II, há uma pequena queda na carga em função de um crescimento instável de trinca e, portanto,  $P_Q$  é definido como sendo a carga a partir da qual ocorre essa queda. No tipo III, o material não sai da linearidade, e  $P_Q$  é definido como sendo  $P_{\max}$ . Por meio de  $P_Q$  é possível determinar a tenacidade à fratura condicional ( $K_Q$ ), como mostra a Eq. (2.4)

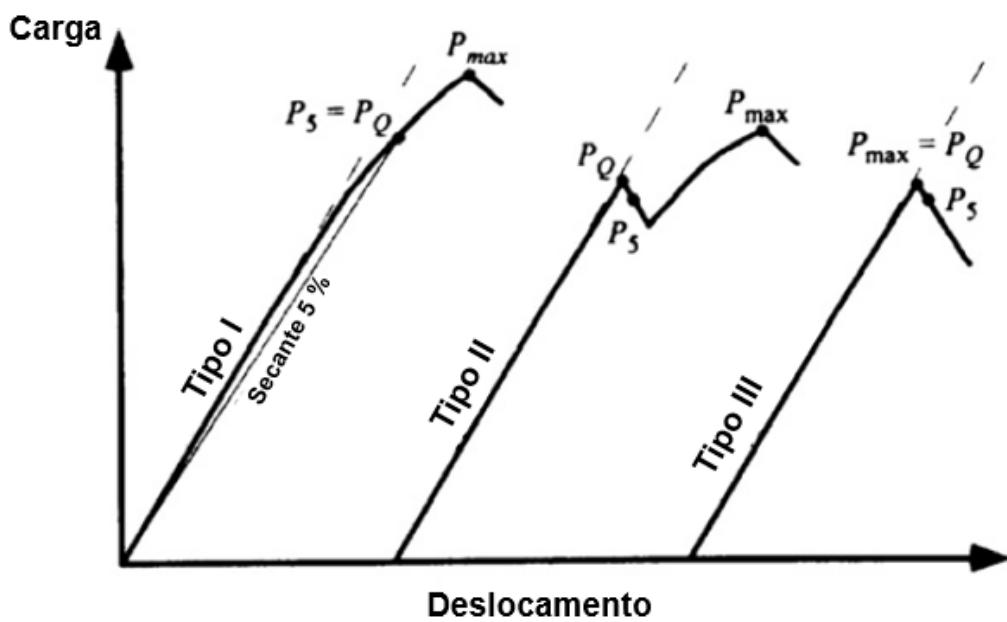


Figura 2.7 - Três tipos de curvas carga vs. deslocamento obtidas em um ensaio de tenacidade à fratura de acordo com a norma ASTM E399 (ASTM, 2019) (Modificada de ZHU e JOYCE, 2012).

$$K_Q = \frac{P_Q f(a/w)}{B \sqrt{w}} \quad (2.4)$$

Na Equação (2.4),  $B$  é a espessura do corpo de prova,  $W$  é a largura do corpo de prova e  $f(a/W)$  é uma função dependente da relação entre o comprimento de trinca inicial e a largura

do corpo de prova ( $a/W$ ). A função  $f(a/W)$  varia de acordo com o tipo de corpo de prova ensaiado.

Além disso, como já dito anteriormente, o valor de  $K_C$  diminui à medida que se eleva a espessura do corpo de prova, até o momento em que passa a predominar o estado plano de deformação e é possível determinar o valor de  $K_{IC}$ . Dessa forma, a norma ASTM E399 (ASTM, 2019) regulamenta as dimensões do corpo de prova para que se obtenha corretamente  $K_{IC}$ . Para tanto duas imposições propostas por Brown e Srawley (1966) e Srawley et al. (1967), juntamente com aquela que determina a faixa de  $a/W$  entre 0,45 e 0,55, são responsáveis por validar o resultado do ensaio. As Equações (2.5) e (2.6) mostram essas imposições. Verificada a validade do ensaio,  $K_Q$  pode enfim ser definido como o  $K_{IC}$  do material ensaiado.

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.5)$$

$$P_{máx} \leq 1,1P_Q \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Integral J

Diferentemente da MFLE, na qual uma limitação muito importante é a consideração de que não ocorre deformação plástica na ponta da trinca, a Mecânica da Fratura Elastoplástica possibilita efetuar o estudo do desenvolvimento da trinca e a tenacidade à fratura considerando que a ponta da trinca se deforma plasticamente (HAAG, 2012). A MFEP dispõe de duas abordagens a serem seguidas: o método *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD) e o método da Integral J. O primeiro é baseado em conceitos físicos, enquanto o segundo se fundamenta em equações de balanço de energia.

Anderson (2005) afirma que ambos os métodos (CTOD e Integral J) são capazes de prover parâmetros que podem ser utilizados como critérios na análise de fraturas. Além disso, seus valores críticos manifestam baixa dependência das dimensões do corpo de prova em questão, logo a MFEP apresenta limites dimensionais menos severos que a MFLE.

Baseado nos conceitos da teoria da plasticidade, Rice (1968) desenvolveu o método da Integral J, a qual pode ser entendida como um balanço energético que visa generalizar a taxa de liberação de energia potencial na trinca em relação à variação do comprimento dela. A Integral J possibilita caracterizar a fratura em materiais não lineares, a partir da idealização da deformação elastoplástica presente nesses materiais como uma deformação “elástica não linear”. A Equação (2.7) mostra a formulação da Integral J obtida por Rice (1968).

$$J = \int_{\Gamma} \left( W dy - \bar{T} \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) ds \quad (2.7)$$

Na Equação (2.7),  $\Gamma$  é o contorno escolhido a ser seguido (Fig. 2.8), percorrido em sentido anti-horário, com início e final não coincidentes em cada uma das faces da trinca,  $W$  é a densidade de energia de deformação,  $\bar{T}$  é o vetor tensão definido pela normal  $\bar{n}$  ao contorno,  $\bar{u}$  é o vetor deslocamento na direção  $x$  e  $s$  é o comprimento do caminho escolhido.

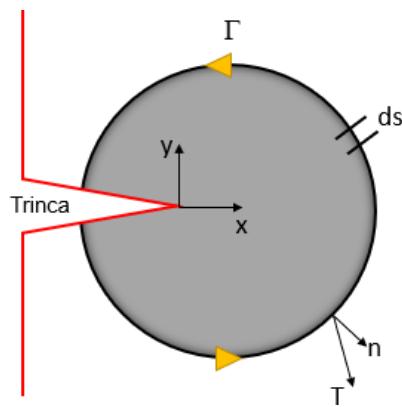


Figura 2.8 - Representação esquemática de um caminho escolhido no método Integral J (Modificada de LOPEZ, 2010).

Vale ressaltar que a Integral J é calculada de forma independente do caminho, ou seja, ela não depende do estado de tensões na frente da trinca (RICE, 1968). Ao se tratar de materiais não lineares, a propagação da trinca ocorre de forma lenta, pois há uma resistência do material oriunda da deformação que ele experimenta à medida que a trinca se propaga. Medina (2014) afirma que esse crescimento é estável e lento.

Assim como no teste de determinação de  $K_{IC}$ , no teste para obter a integral J é necessário medir a força aplicada e o deslocamento na linha de aplicação da força. A norma ASTM E1820 (ASTM, 2018) propõe a construção de uma curva  $J-R$  para obtenção de um valor  $J_{IC}$ , o que requer a medição do comprimento da trinca durante o teste. O parâmetro  $J_{IC}$  é interpretado como o valor da Integral J a partir do qual tem-se o início de uma propagação dúctil da trinca, como mostra a Fig. 2.9. Entretanto, a definição do valor de  $J_{IC}$  é feita arbitrariamente, tendo em vista que é improvável definir o ponto exato onde ocorre o início da estabilidade do crescimento da falha (ANDERSON, 2005).

Existem dois tipos de teste da integral J, quais sejam: o teste de múltiplos corpos de prova e o teste de um único corpo de prova. No teste de múltiplos corpos de prova, vários espécimes são carregados até ocorrer uma propagação dúctil da trinca. Após isso, o corpo de prova é descarregado, quebrado e o comprimento da trinca medido visualmente na

superfície de fratura. Cada um deles é utilizado para gerar um único ponto na curva  $J$ - $R$ . A norma ASTM E1820 (ASTM, 2018) prevê que nesse teste é determinado o  $J_{IC}$  no início de propagação dúctil e, portanto, não é necessária uma curva  $J$ - $R$  completa.

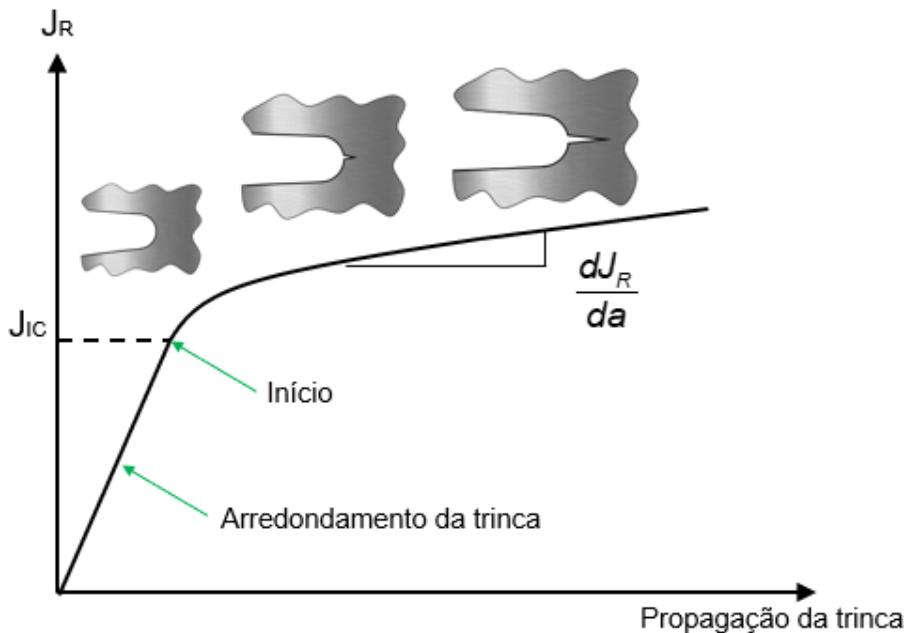


Figura 2.9 - Curva  $J_R$  (Modificada de ANDERSON, 2005).

Para o teste de um único corpo de prova, deve ser obtida a curva  $J$ - $R$  completa. Para tanto, dois métodos foram desenvolvidos com os comprimentos de trinca sendo monitorado durante o teste. O primeiro e mais utilizado é o método da flexibilidade elástica com descarregamento, o qual utiliza as propriedades elásticas do corpo de prova para avaliar o comprimento da trinca. Foi proposto pioneiramente por Clarke et. al (1976) e posteriormente padronizado pela norma ASTM E813 (ASTM, 1981). Joyce e Gudas (1979) aprimoraram esse método ao desenvolverem um programa computacional interativo para a realização de uma série de testes para avaliação da flexibilidade elástica do corpo de prova. Atualmente a norma ASTM E1820 (2018) abrange as regulamentações para esse método, definindo como deve ser realizada a medição do comprimento da trinca instantâneo e a construção da curva  $J$ - $R$ .

Outro método proposto é o método de queda de potencial elétrico, o qual foi originalmente desenvolvido por Johnson (1965) e se baseia no monitoramento do crescimento da trinca por meio da medição da variação de resistência elétrica. Ao se aplicar uma corrente elétrica em um corpo de prova, o potencial elétrico nos pontos de calibração eleva à medida que a trinca se propaga. Para tanto, esse método se restringe a materiais que são condutores elétricos e possuem uma resistência elétrica mensurável. Comparado ao outro método, o

método de queda em potencial possibilita a construção da curva  $J$ - $R$  com um maior número de pontos.

Medina (2014) alega que utilizar o valor de  $J_{IC}$  como um limitante de projeto é muito conservador, tendo em vista que, teoricamente, à medida que a trinca cresce, ocorre o aumento da resistência, o que é excluído das considerações da Integral  $J$ .

### 2.1.3 CTOD

O método  $CTOD$  trata basicamente de caracterizar o comportamento à fratura, avaliando o deslocamento de abertura entre as faces da trinca. Os estudos sobre esse método tiveram início pelo pesquisador Wells (1963), o qual notou que durante a ocorrência de trincas em materiais dúcteis, há uma significativa plasticidade na ponta da trinca. A Figura 2.10 indica o formato que a trinca deveria ter se ela não estivesse submetida a deformações plásticas (trinca aguda) e o real formato de trinca observado (trinca arredondada).

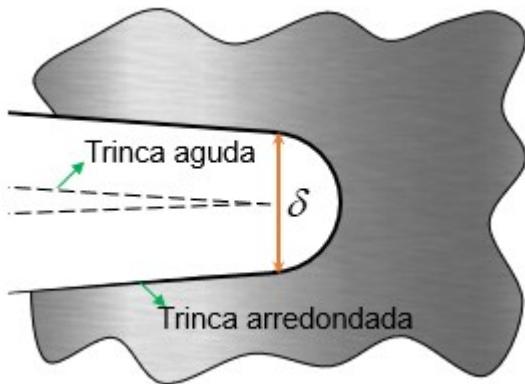


Figura 2.10 - Uma trinca aguda se deformando plasticamente e dando origem a uma trinca arredondada, cuja abertura de ponta é  $\delta$  (Modificada de ANDERSON, 2005).

O primeiro modelo que visava o cálculo do  $CTOD$  foi também proposto por Wells (1963). Ele correlaciona a abertura da ponta das trincas com as tensões atuantes naquela região, propondo que a abertura da ponta é um parâmetro a ser utilizado na determinação da tenacidade à fratura. Considerando a existência de uma zona plástica na ponta da trinca (Fig. 2.11), é possível correlacionar a medida  $u_y$  ao fator de intensidade de tensão no limite do escoamento, obtendo a Eq. (2.8).

$$u_y = \frac{k+1}{2\mu} K_I \sqrt{\frac{r_y}{2\pi}} \quad (2.8)$$

Na Equação (2.8),  $\mu$  é o módulo de cisalhamento,  $k = (3 - 4\nu)$  para estado plano de deformação,  $k = (3 - \nu)(1 + \nu)$  para estado plano de tensão,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $K_I$  é o fator de intensidade de tensão do modo I e  $r_y$  é o raio da zona plástica.

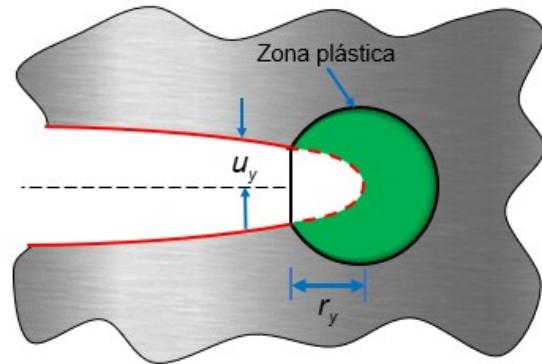


Figura 2.11 - Estimativa do CTOD a partir do deslocamento da trinca efetiva na zona plástica proposta inicialmente por Irwin (Modificada de ANDERSON, 2005).

Na Figura 2.11 é possível notar que o CTOD ( $\delta$ ) pode ser determinado multiplicando  $u_y$  por 2, como mostra a Eq. (2.9). Nesta equação,  $\sigma_{ys}$  representa o limite de escoamento do material e  $E$  é o módulo de elasticidade.

$$\delta = 2u_y = \frac{4K_I^2}{\pi\sigma_{ys}E} \quad (2.9)$$

Além do método proposto por Wells (1963), existem outros métodos que são reconhecidos internacionalmente. Um deles foi proposto por Burdekin e Stone (1966), os quais fizeram a dedução da expressão para cálculo do parâmetro CTOD a partir do modelo exposto por Dugdale (Fig. 2.12).

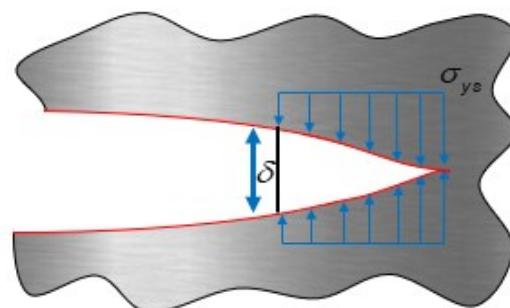


Figura 2.12 - Estimativa do CTOD por meio de Dugdale (Modificada de BURDEKIN e STONE, 1966).

A expressão obtida por Burdekin e Stone (1966) é dada pela Eq. (2.10). Nesta equação  $\sigma$  representa a tensão de trabalho.

$$\delta = \frac{8\sigma_{ys}a}{\pi E} \ln \left[ \sec \left( \frac{\pi\sigma}{2\sigma_{ys}} \right) \right] \quad (2.10)$$

Atualmente, as normas ASTM E1820 (ASTM, 2018) e ASTM E1290 (ASTM, 2013) regulamentam os procedimentos para determinação do CTOD. Os corpos de prova recomendados são o SE(B) e o C(T) com relação entre o comprimento de trinca inicial e largura do corpo de prova na faixa 0,45 e 0,7. A Equação (2.11) mostra como seu cálculo é realizado seguindo a norma ASTM E1820 (ASTM, 2018). Nela,  $J_{pl}$  representa o componente plástico e  $m$  é uma função do tamanho da trinca e das propriedades dos materiais, sendo calculada como mostra a Eq. (2.12).

$$\delta = \frac{J}{m\sigma_Y} = \frac{1}{m\sigma_Y} \left[ \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + J_{pl} \right] \quad (2.11)$$

$$m = A_0 - A_1 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right) + A_2 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right)^2 - A_3 \left( \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{ts}} \right)^3 \quad (2.12)$$

Na Equação (2.12),  $\sigma_{ys}$  é o limite de escoamento do material,  $\sigma_{ts}$  é o limite de resistência à ruptura do material e  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são respectivamente iguais a 3,62, 4,21, 4,33 e 2,00 para corpos de prova C(T). Para corpos de prova SE(B) estes parâmetros devem ser calculados em função da largura ( $W$ ) e do comprimento de trinca inicial ( $a_0$ ) como mostram as Eqs. (2.13) a (2.16). Além disso, a Eq. (2.12) requer que uma relação entre  $\sigma_{ys}$  e  $\sigma_{ts}$  maior ou igual a 0,5.

$$A_0 = 3,18 - 0,22 \left( \frac{a_0}{W} \right) \quad (2.13)$$

$$A_1 = 4,32 - 2,23 \left( \frac{a_0}{W} \right) \quad (2.14)$$

$$A_2 = 4,44 - 2,29 \left( \frac{a_0}{W} \right) \quad (2.15)$$

$$A_3 = 2,05 - 1,06 \left( \frac{a_0}{W} \right) \quad (2.16)$$

## 2.2 SNTT

O parâmetro  $K_{IC}$  é definido para uma propagação drástica da trinca, enquanto a integral  $J$  e o  $CTOD$  são determinados considerando uma propagação dúctil. Em prática, a maior quantidade de problemas enfrentados pela engenharia se dá devido a incapacidade de se prever a ocorrência de fraturas drásticas de um material. Isso destaca a importância de determinar o valor de  $K_{IC}$ . Em casos em que a trinca se propaga de maneira dúctil, atualmente, existem equipamentos que possibilitam o seu monitoramento e a ocorrência da fratura pode ser prevista e, em alguns casos, evitada.

Como já dito anteriormente, o método convencional definido pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019) determina que quanto menor a espessura dos corpos de prova, maior o efeito das extremidades e, consequentemente, não há a predominância de um estado plano de deformação como desejado. O grande problema é que, quando são realizados ensaios em materiais com elevados valores de tenacidade à fratura e limite de escoamento, a espessura para garantir a predominância do estado plano de deformação aumenta proporcionalmente. Quanto mais espesso for o corpo de prova, maiores as outras dimensões, e consequentemente, mais material é consumido e um sistema de teste com maior capacidade de aplicação de carga é necessário (WANG, 2019). Em consequência disso, aqueles materiais com maiores propriedades mecânicas não têm tido o  $K_{IC}$  determinado.

Com o objetivo de suprimir as limitações do método convencional descritos pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019), estudiosos buscaram desenvolver alternativas para determinar o valor de  $K_{IC}$  para todos os materiais. Dentre uma dessas alternativas, no final do século XX, o método denominado Teste de Torção de Entalhe Helicoidal (SNTT) foi desenvolvido, sendo patenteado posteriormente por Wang e Liu (2003).

De acordo com Wang e Liu (2015), no método SNTT aplica-se um torque na extremidade do corpo de prova submetendo-o por completo a forças de cisalhamento uniformes ao longo de todo seu comprimento. Seu procedimento se baseia na aplicação de uma torção pura em corpos de prova cilíndricos com uma linha de entalhe sob um ângulo de passo de 45º (Fig. 2.13).

A torção pura estabelece um campo de tensão tração/compressão equibiaxial e uniforme, desenvolvendo efetivamente um Modo I de falha (modo de abertura), como mostrado na Fig. 2.13. Desta forma, é possível gerar um valor de tenacidade à fratura intrínseca do material testado, eliminando o efeito das dimensões do corpo de prova e estabelecendo um teste mais confiável e econômico, que ainda é capaz de ter uma propagação consistente e estável da trinca (WANG, 2019).

A Figura 2.14 mostra uma comparação entre um corpo de prova SNTT e um C(T). Ensaios com corpos de prova C(T) têm sido amplamente utilizados, porque sua configuração geométrica é a mais próxima do que ocorre na prática no que se refere à nucleação e propagação de uma trinca. Consequentemente, os resultados dos testes C(T) são aceitos pela comunidade acadêmica como aqueles com maior confiabilidade. Embora seja um teste confiável, ele tem uma limitação muito importante quanto as dimensões do corpo de prova.

Segundo Wang (2019), a miniaturização é um objetivo fundamental do método SNTT. Isso é possível porque os valores de  $K_{IC}$  determinados por este são virtualmente independentes do tamanho do corpo de prova. Ao analisar os campos de tensão e deformação na superfície do corpo de prova C(T), observa-se que a informação necessária para determinar o valor de  $K_{IC}$  se manifesta em uma região muito próxima da ponta da trinca. Por outro lado, ao realizar um teste em um corpo de prova SNTT, essa região se estenderá ao longo de todo o entalhe, permitindo a miniaturização do corpo de prova sem a perda de validade do valor de  $K_{IC}$  (Fig. 2.14).

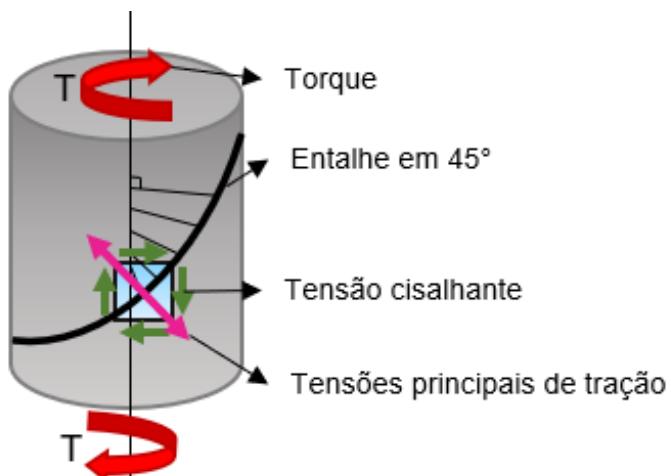


Figura 2.13 - Esquema básico do comportamento das tensões em um corpo de prova durante um ensaio SNTT (Modificada de WANG et al., 2008).

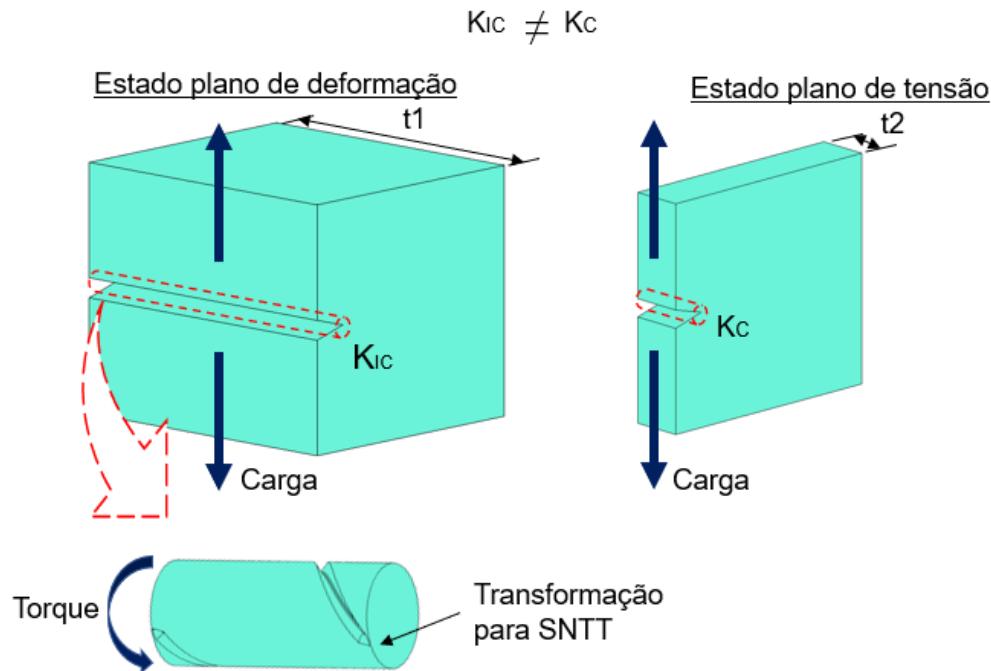


Figura 2.14 - Comparação entre um corpo de prova C(T) e um corpo de prova SNTT (Modificada de WANG e LIU, 2008).

No entanto, em estruturas reais, não há apenas a ocorrência de falhas oriundas de um único modo de fratura. Normalmente, em sistemas de tubulação, como os usados na indústria petrolífera, existem componentes como curvas, curvas em U, junção em T, dentre outros, que por mais que tenham sido bem instalados e forneçam boa flexibilidade ao sistema como um todo, inferem na presença de cargas de torção, além de esforços de flexão comumente presentes. Dessa forma, o modo de fratura é misto (modo I e modo III). A determinação do comportamento da estrutura, quando submetida a um modo misto de fratura, é muito difícil de ser realizada pelos métodos tradicionais. Já o método SNTT possui uma grande vantagem, pois é possível realizar testes de tenacidade à fratura em modo misto ao se usar um ângulo de inclinação do entalhe helicoidal diferente ou aplicando várias combinações de cargas de tensão e torção ao corpo de prova padrão (WANG e LIU, 2015). Variando o ângulo de inclinação do entalhe obtém-se três tipos diferentes de modos de falha, quais sejam:

- Modo I (modo de abertura) – quando o ângulo é de 45°;
- Modo III (modo de cisalhamento) – quando o ângulo é de 90°;
- Modo misto (modo I + modo III) – quando o ângulo não é 45° nem 90°.

### 2.2.1 Equações analíticas do ensaio SNTT

Wang et al. (2000), no início do estudo do método SNTT, utilizaram os softwares PATRAN® e ABAQUS® no desenvolvimento de uma malha tridimensional para análise do corpo de prova e do crescimento da trinca durante o ensaio. O objetivo desse estudo era

identificar como ocorria o crescimento da trinca e as principais variáveis de influência na mesma. Ao longo do estudo, Wang et al. (2000) consideraram as deformações ocorridas nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , em ambas as faces da trinca, como pode ser observado na Fig. 2.15. Como resultado, eles obtiveram equações para  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$  em função das deformações na trinca.

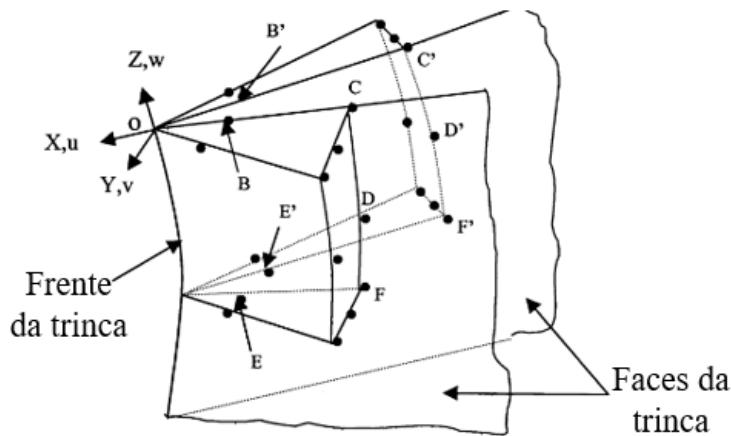


Figura 2.15 - Modelo de simulação mostrando a origem do sistema de coordenadas fixada na ponta da trinca e os vetores unitários  $u$  na direção de  $x$ ,  $v$  na direção de  $y$  e  $w$  na direção de  $z$  (Modificada de WANG et al., 2000).

Em trabalhos posteriores (WANG et al., 2004; WANG et al., 2008; WANG et al., 2010) nenhuma descrição da metodologia adotada pelos autores para obtenção de resultados dos valores de  $K_{IC}$  foi apresentada. Em trabalhos mais recentes (WANG et al., 2012; WANG et al., 2014) apresentaram detalhes sobre os procedimentos do ensaio SNTT. Dentre as informações apresentadas pode ser citado que a simulação foi realizada em um cilindro cujo valor de altura  $h$  foi estabelecido sendo um-oitavo do comprimento do passo do entalhe do corpo de prova SNTT ( $p$ ) (Fig. 2.16). Essa relação de um-oitavo visa garantir um ângulo de passo do entalhe no cilindro de 45°, como mostra a Eq. (2.17). Vale ressaltar que o passo do entalhe é calculado como sendo  $\pi(D - a)$ , onde  $D$  é o diâmetro do corpo de prova e  $a$  é o comprimento da trinca após o processo de abertura da pré-trinca por fadiga.

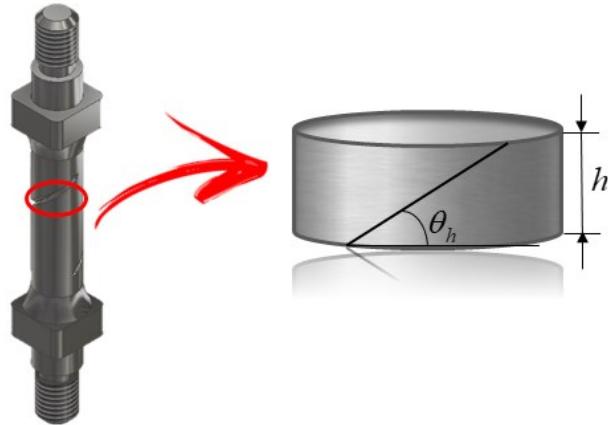


Figura 2.16 - Definição das dimensões do cilindro simulado por Wang et al. (2012).

$$\theta_h = 2\pi \frac{h}{p} = 2\pi \left( \frac{1}{8} \right) = \frac{\pi}{4} \quad (2.17)$$

Wang et al. (2014) com as simulações realizadas no cilindro, avaliaram a evolução da complacência do SNTT e as taxas de liberação de energia com a variação da relação  $\frac{a}{D}$  de 0,1 a 0,45 (Fig. 2.17). Como resultado, dois parâmetros não-dimensionais, o ângulo de deformação unitário característico ( $\gamma$ ) e a taxa característica de liberação de energia do ensaio SNTT ( $G$ ) foram obtidos. Estes parâmetros possibilitam quantificar o crescimento de trinca durante o processo SNTT em diferentes condições de teste e materiais (Figs. 2.18 e 2.19). Pode-se notar que, independentemente das condições de simulação, as curvas obtidas foram iguais, Eqs. (2.18) e (2.19) (WANG, 2019).

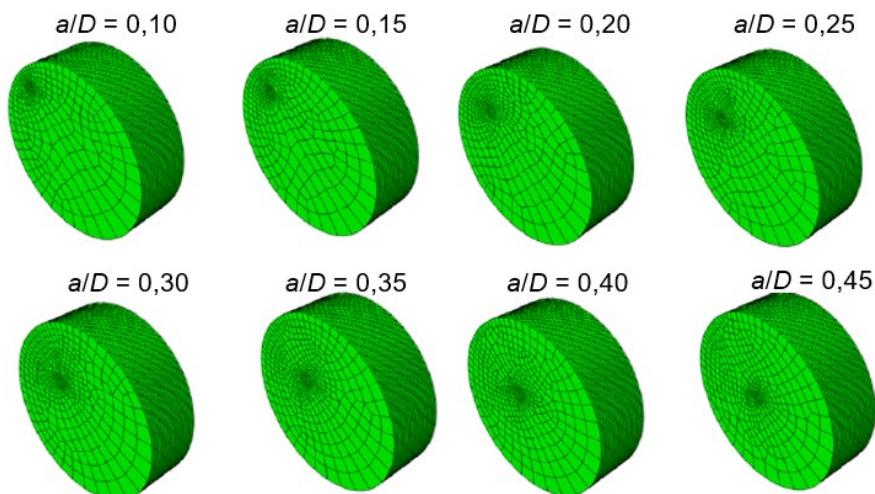


Figura 2.17 - Avaliação do crescimento da trinca no cilindro simulado, utilizando uma simulação em elementos finitos (WANG, 2019).

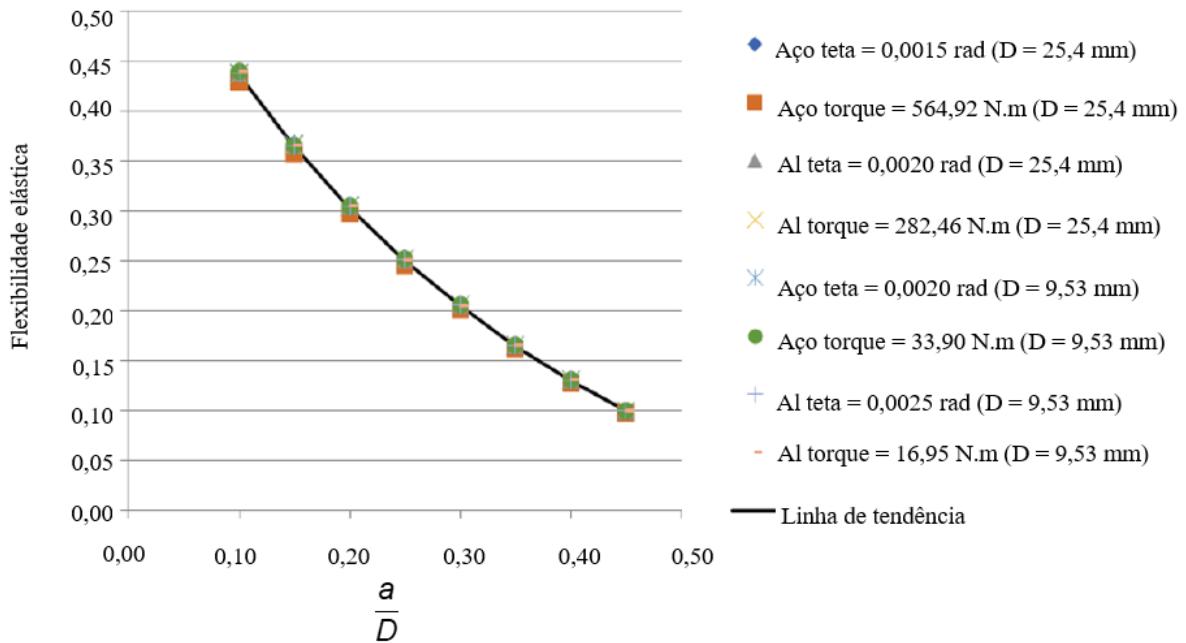


Figura 2.18 - Evolução da complacência característica durante o crescimento da trinca no ensaio SNTT (WANG, 2019).

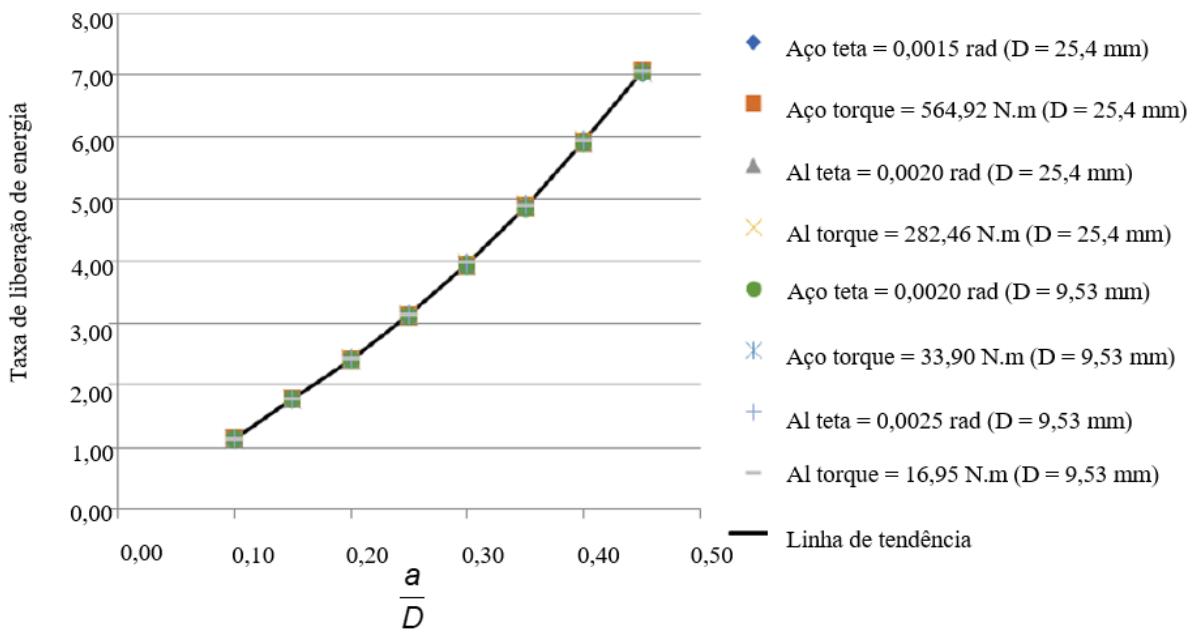


Figura 2.19 - Evolução da taxa característica de liberação de energia durante o crescimento da trinca no ensaio SNTT (WANG, 2019).

$$\frac{\gamma}{T} \mu \left(1 - \frac{a}{D}\right)^4 = 3,3445 \left(\frac{a}{D}\right)^4 - 5,2514 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + 4,0568 \left(\frac{a}{D}\right)^2 - 2,2298 \left(\frac{a}{D}\right) + 0,6226 \quad (2.18)$$

$$\frac{GA}{T\theta\left(1-\frac{a}{D}\right)^2} = -154,56\left(\frac{a}{D}\right)^4 + 188,95\left(\frac{a}{D}\right)^3 - 62,398\left(\frac{a}{D}\right)^2 + 20,626\left(\frac{a}{D}\right) - 0,4716 \quad (2.19)$$

Nas Equações (2.18) e (2.19),  $a$  é o comprimento total da trinca,  $D$  é o diâmetro do corpo de prova,  $A$  é a área da seção transversal do corpo de prova,  $T$  é o torque aplicado,  $\theta$  é o ângulo de torção associado e  $\mu$  é o módulo de cisalhamento do material do corpo de prova.

De posse dessas equações, de acordo com Wang et al. (2014), é possível estimar os valores de  $G$  e de  $K_{IC}$ . Além disso, de acordo com Wang et al. (2019), por meio dessas equações é possível também monitorar o crescimento de pré-trinca no processo de abertura de trinca por fadiga.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA

No presente capítulo é apresentada e validada experimentalmente a metodologia proposta para determinação da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) por meio do método de teste de torção com entalhe helicoidal (SNTT). Para um melhor entendimento a mesma foi dividida em cinco etapas, quais sejam: desenvolvimento da metodologia do ensaio SNTT, aplicação da metodologia proposta para determinação do  $K_{IC}$  pelo método SNTT, validação experimental da metodologia, controle dimensional e geométrico dos corpos de prova, avaliação da incerteza de medição e o detalhadamento da metodologia proposta.

#### 3.1. Desenvolvimento da metodologia do ensaio SNTT

A metodologia desenvolvida para a determinação da tenacidade à fratura por meio do método SNTT tem como base os trabalhos de Wang et. al (2003), Wang et. al (2012), Wang et. al, (2014) e Wang (2019). Os modelos analíticos obtidos por Wang et. al (2014) via simulação tridimensional do corpo de prova SNTT para diferentes condições de aplicação de torque, ângulo de torção e comprimentos de trinca são utilizados como o ponto de partida. Estas equações foram posteriormente validadas por Wang et. al (2019).

O ensaio SNTT pode ser dividido em duas etapas: abertura de pré-trinca por fadiga e carregamento monotônico. A abertura da pré-trinca é de suma importância nos ensaios de tenacidade à fratura. De acordo com a ASTM E399 (ASTM, 2019), a presença de uma trinca no corpo de prova simula de forma realista componentes estruturais que apresentam trincas em condições de serviço. Após a nucleação e propagação de uma trinca por fadiga, o corpo de prova é submetido a uma torção monotônica gradativa até a fratura.

Um aspecto que deve ser levado em consideração antes de dar início aos trabalhos é o projeto do passo do entalhe. Essa dimensão do corpo de prova do ensaio SNTT se encontra diretamente relacionada à necessidade de se garantir o modo I puro na frente da trinca. Entretanto, previamente à definição do passo do entalhe, é necessário determinar qual o valor da relação  $a/D$  que o corpo de prova deverá possuir ao final da abertura de pré-trinca. Wang et. al (2019), validaram as Eqs. (2.18) e (2.19), que descrevem a flexibilidade elástica do corpo de prova SNTT e a taxa de alívio de energia durante o ensaio, para uma relação  $a/D$  entre 0,1 e 0,45. É importante ressaltar que o valor da relação  $a/D$  não interfere na confiabilidade do ensaio, sendo apenas um parâmetro indicativo da propagação da trinca durante a abertura de pré-trinca por fadiga.

### 3.1.1 Procedimento de abertura de pré-trinca por fadiga

A primeira etapa do processo de abertura da pré-trinca consiste na determinação do torque a ser aplicado no ciclo de fatiga. Para tanto, são utilizadas as Eqs. (2.18) e (2.19), as quais são essenciais para controle do ensaio. Vale ressaltar que os parâmetros presentes nas Eqs. (2.18) e (2.19) não foram completa e claramente definidos por Wang et. al, (2014). Por exemplo, não foi especificado se o ângulo de torção  $\theta$  presente na Eq. (2.19) se refere ao ângulo de torção do corpo de prova ou do cilindro simulado. Sabendo que há uma diferença numérica significativa entre estes dois valores, erros de ordem elevada podem ser induzidos nos valores de  $K_{IC}$  se o ângulo de torção não for especificado de forma correta.

Após estudos mais aprofundados, se concluiu que o parâmetro  $\theta$  se restringia ao ângulo de torção do cilindro simulado. Além disso, foi observado que este ângulo de torção está diretamente relacionado ao parâmetro  $\gamma$ , como mostra a Eq. (3.1). Consequentemente, as Eqs. (2.18) e (2.19) estão relacionadas entre si. Se concluiu também que o ângulo de torção do corpo de prova é oito vezes o valor do ângulo de torção do cilindro simulado, como mostra a Eq. (3.2).

$$\theta_{cilindro} = \gamma L \quad (3.1)$$

$$\theta_{cilindro} = \frac{\theta_{CP}}{8} \quad (3.2)$$

Nas Equações (3.1) e (3.2),  $\theta_{cilindro}$  é o ângulo de torção do cilindro simulado,  $\gamma$  é novamente definido como deformação angular de uma unidade dentro do cilindro simulado,  $L$  é o comprimento do cilindro simulado e  $\theta_{CP}$  é o ângulo de torção do corpo de prova.

Wang et. al (2012) especificaram que a relação entre  $L$  e o passo do entalhe ( $p$ ) também é de 1/8. De posse de todas essas informações, as Eqs. (2.18) e (2.19) foram modificadas, resultando nas Eqs. (3.3) e (3.4).

$$T = \frac{8.G.A}{\theta_{CP} \left(1 - \frac{a}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{-154,56 \left(\frac{a}{D}\right)^4 + 188,95 \left(\frac{a}{D}\right)^3 - 63,398 \left(\frac{a}{D}\right)^2 + 20,626 \left(\frac{a}{D}\right) - 0,4716}} \quad (3.3)$$

$$\theta_{CP} = \frac{T.p}{\mu \left(1 - \frac{a}{D}\right)^4} \cdot \left[ 3,3445 \left(\frac{a}{D}\right)^4 - 5,2514 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + 4,0568 \left(\frac{a}{D}\right)^2 - 2,2298 \left(\frac{a}{D}\right) + 0,6226 \right] \quad (3.4)$$

As Equações (3.3) e (3.4), quando associadas à Eq. (3.5), permitem calcular o valor de torque necessário para desenvolver na ponta da trinca um fator de intensidade de tensão máximo ( $K$ ). Vale lembrar que  $K_{max}$  da pré-trinca por fadiga deve ser no máximo 60 % do valor teórico da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ), como recomendado pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019).

$$G = K^2 \frac{(1-\nu^2)}{E} \quad (3.5)$$

Na Equação (3.5),  $E$  e  $\nu$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material. Estas propriedades mecânicas, juntamente com o módulo de cisalhamento, presentes nas Eqs. (2.18), (2.19), (3.3) e (3.4) devem ser previamente determinadas por meio de ensaios de tração.

Determinado o torque a ser aplicado para garantir a obtenção de 60 % do valor de  $K_{IC}$  do material na frente da trinca final, são definidos os valores de torque do ciclo de fadiga. Neste trabalho se adotou uma razão  $R = 0,1$  entre os torques máximo e mínimo a serem aplicados durante o ciclo de fadiga, Eq. (3.6). Também, é possível calcular o valor do ângulo de torção ( $\theta_{final}$ ) aplicado no corpo de prova ao final da pré-trinca. O valor de  $\theta_{final}$  é definido como critério de parada da abertura da pré-trinca durante a realização do teste.

$$T_{máx} = T_{estimado} = 10T_{min} \quad (3.6)$$

Na Equação (3.6),  $T_{máx}$  é o torque máximo aplicado ao corpo de prova durante o ciclo de fadiga,  $T_{estimado}$  é o torque determinado utilizando as Eqs. (3.3) a (3.5) e  $T_{min}$  é o torque mínimo aplicado durante o ciclo de fadiga.

Outro importante parâmetro que deve ser determinado é a frequência de aplicação do ciclo de fadiga, a qual tem influência direta na quantidade de ciclos necessários para o crescimento da pré-trinca até o comprimento desejado. Normalmente, ensaios de abertura de pré-trinca são realizados em frequências de até 15 Hz.

Para facilitar o entendimento de abertura da pré-trinca, a Fig. 3.1 mostra por meio de um fluxograma todas as etapas do processo. É importante destacar que durante o processo de pré-trinca, a propagação desta deve ser constantemente monitorada, por meio da medição do ângulo de torção do corpo de prova ( $\theta_{CP}$ ). Isso é possível, pois à medida que a trinca se propaga, menor é a resistência oferecida pelo corpo de prova à torção e, consequentemente, o ângulo desenvolvido pelo corpo de prova aumenta gradativamente. Quando o ângulo de torção ( $\theta_{CP}$ ) for igual ao valor do ângulo definido como critério de parada ( $\theta_{final}$ ), o processo de abertura de pré-trinca é interrompido. Este fato indica que a relação  $a/D$  previamente definida foi alcançada.

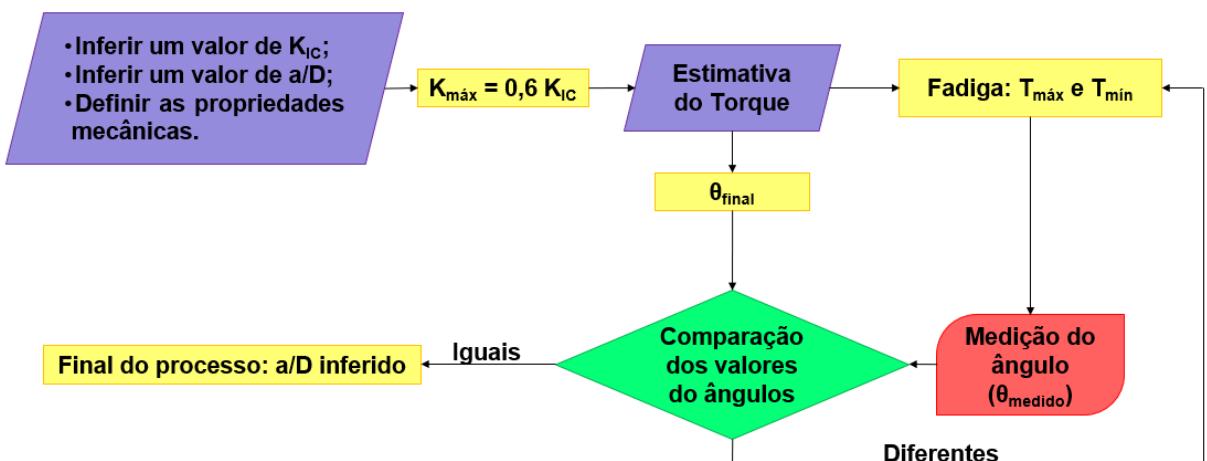


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de pré-trinca por fadiga na aplicação do método SNTT.

### 3.1.2 Procedimento de determinação da tenacidade à fratura

O corpo de prova é submetido à torção monotônica em taxa de carregamento constante, até a fratura deste. A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) recomenda uma taxa de carregamento entre 0,30 e 1,5 kN/s para o método convencional. No momento da fratura, se mede o torque e o ângulo de torção do corpo de prova e, posteriormente, o comprimento da pré-trinca. De posse dos valores desses parâmetros é possível determinar  $G$  e, consequentemente, o  $K_{IC}$  para o material avaliado por meio das Eqs. (3.3) a (3.5). A Figura 3.2 mostra um diagrama de blocos representando as etapas do processo de cálculo da tenacidade à fratura pelo método SNTT.

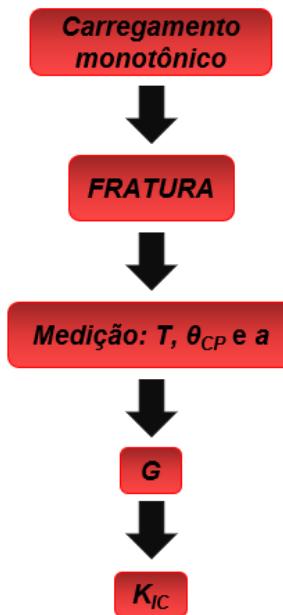


Figura 3.2 – Diagrama de blocos representando o procedimento de cálculo de tenacidade à fratura pelo método SNTT.

Infere-se a partir das Figs. 3.1 e 3.2 que a essência do método SNTT é simples, mostrando-se uma alternativa promissora para superar a principal limitação do método convencional, relacionada às dimensões do corpo de prova.

### 3.2. Aplicação da metodologia proposta para avaliação da tenacidade à fratura por meio do método SNTT

A tenacidade à fratura do aço AISI 4340 foi determinada por meio do método SNTT aplicando a metodologia proposta. Os experimentos foram realizados utilizando um sistema de ensaio axial-torcional MTS 809, modelo 646.10S, com faixa nominal de 100 kN e 1100 N.m (Fig. 3.3a). Para fixação dos corpos de prova, garras hidráulicas para diâmetros de 15 mm também da fabricante MTS, modelo 646, foram utilizadas (Fig. 3.3b).

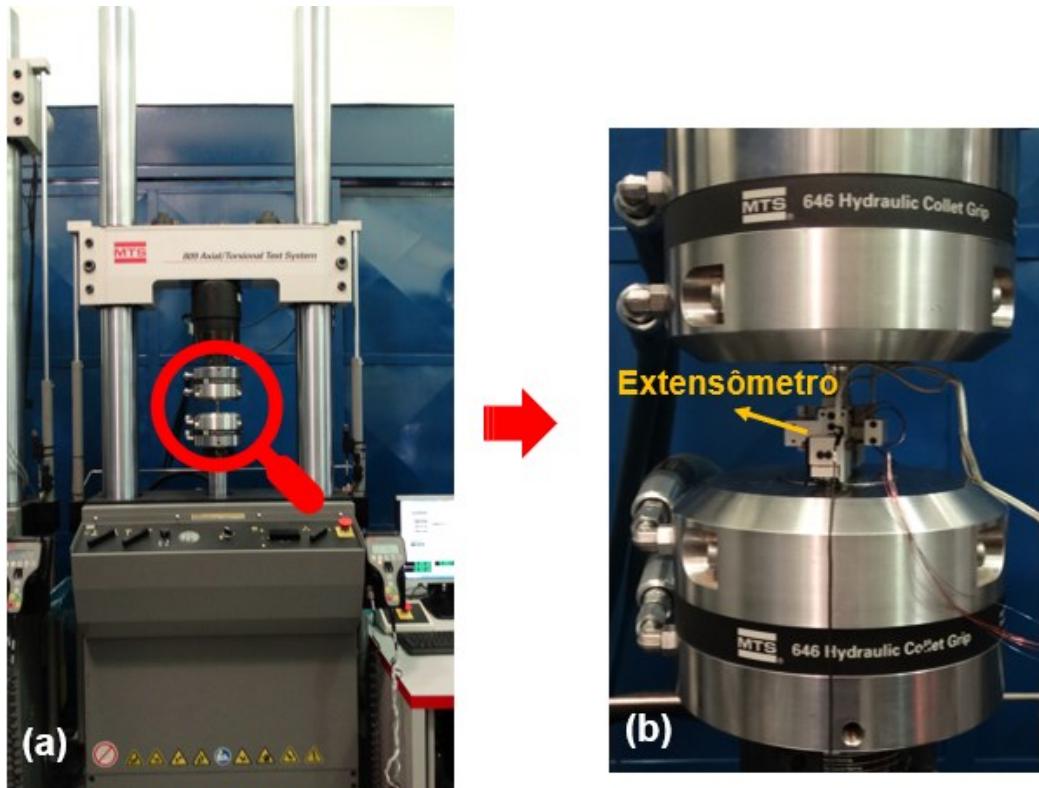


Figura 3.3 - (a) Sistema de ensaio MTS 809; (b) Garras hidráulicas utilizadas para fixação dos corpos de prova (CP).

O ângulo de torção do corpo de prova durante a abertura da pré-trinca foi medido utilizando um RVDT (*Rotary variable differential transformer*) do sistema de ensaio. Entretanto, o desempenho deste equipamento na medição deste ângulo não foi satisfatório. Desta forma,  $\theta_{CP}$  foi medido também utilizando um extensômetro eletromecânico para diâmetros de 10 ou 12 mm, fabricado pela MTS, modelo 632.80F e com comprimento de medição igual a 25 mm. Os valores indicados pelo extensômetro eletromecânico foram então considerados no controle da pré-trinca. O RVDT e o extensômetro eletromecânico possuem, respectivamente, resolução de  $0,0000001^\circ$  e  $0,00000001^\circ$ , e faixa nominal de  $\pm 45^\circ$  e  $\pm 5^\circ$ .

Vale destacar que o extensômetro eletromecânico é fixado diretamente no corpo de prova, enquanto o RVDT é fixado no cilindro hidráulico do sistema de ensaio. Desta forma, o ângulo indicado pelo RVDT é a somatória do ângulo de torção do corpo de prova mais uma parcela correspondente ao ângulo de torção do eixo. Do exposto, se conclui que o ângulo de torção medido pelo RVDT é influenciado, principalmente, pela flexibilidade elástica do sistema de ensaio. Dessa forma, os valores indicados pelo RVDT devem ser corrigidos para que se consiga determinar o  $\theta_{CP}$ . O procedimento adotado para realizar a correção será posteriormente apresentado. Já no carregamento monotônico, apenas o RVDT foi utilizado,

uma vez que o extensômetro eletromecânico pode ser danificado no momento da fratura do corpo de prova.

### 3.2.1. Caracterização do aço AISI 4340

#### a) Análise da composição química

A análise de composição química do aço AISI 4340 foi realizada utilizando um espectrômetro de emissão óptica por descarga luminescente da fabricante LECO, modelo GDS 500, com resolução de 0,001 % em peso. Para tanto uma amostra foi retirada da chapa de aço AISI 4340. A superfície de teste da amostra e a oposta a ela foram retificadas por meio de uma retífica Yadoya RG-280 com rotação máxima de 3400 rpm e rebolo do tipo copo reto AA46k6V com dimensões 177,8 x 76,2 x 76,2 mm<sup>3</sup>. Foi realizada apenas uma queima, e três valores de composição química foram coletados.

#### b) Determinação da direção de laminação

A direção de laminação da chapa de aço AISI 4340 foi verificada para tanto duas amostras foram retiradas como mostra a Fig. (3.4). Uma das amostras foi tratada termicamente, sendo temperada em óleo a partir da temperatura de austenitização de 850 °C por uma hora e revenida durante duas horas na temperatura de 500 °C. Para o tratamento térmico foi utilizado o forno do fabricante Jung, número 5786, modelo 2513, 2 fases, com tensão elétrica de 200 V e 18 A de corrente. A potência do forno é 3,8 kW e sua temperatura máxima de operação é 1300 °C. Enquanto a outra amostra foi avaliada na condição como recebido.



Figura 3.4 - Indicação da posição de retirada das amostras para verificação da direção de laminação da chapa de aço AISI 4340 com direções ainda desconhecidas.

Ambas as amostras foram retificadas, utilizando a retífica Yadoya RG-280, e lixadas por meio de uma lixadeira manual da fabricante Arotec, modelo Aropol E. Durante o lixamento foram utilizadas lixas diamantadas da série MD Piano da Struers (200, 500 e 1200) e água

como lubrificante. Posteriormente, foi realizado o polimento com diamante em uma politriz manual Arotec, modelo Aropol E, utilizando uma série de discos de polimento MD Nap Struers.

Para a verificação da direção de laminação da chapa, laminação (L), transversal (T) e de topo (S), a amostra foi atacada com a solução química tepol. Posteriormente, foram adquiridas imagens da microestrutura em três faces da amostra via microscópio óptico Olympus, modelo BX51M. Este equipamento possui uma câmera digital Zeiss, modelo AxioCam ICc5. As imagens foram analisadas utilizando o software AxioVision® do próprio microscópio.

c) *Tratamento térmico*

O AISI 4340 é considerado um aço para beneficiamento, isto é, possui boa temperabilidade e, portanto, suas propriedades mecânicas variam consideravelmente em função dos diferentes tratamentos térmicos realizados. Para a execução dos ensaios, na dependência de se obter resultados válidos também para aplicação do método convencional, como determina a norma ASTM E399 (ASTM, 2019), o aço AISI 4340 foi tratado para uma dureza de 45 HRC. O tratamento térmico consistiu de têmpera em óleo com austenitização a 850 °C no período de uma hora, seguido de revenimento a uma temperatura de 420 °C também durante o período de uma hora.

d) *Medição de dureza*

A dureza foi medida utilizando um durômetro Stiefelmayer-Reicherter, modelo KL-4. Foram realizadas identações Vickers, com carga de 10 kgf e tempo de aplicação de 15 segundos, conforme as determinações da norma ASTM E92 (ASTM, 2017). Esse equipamento, quando configurado de maneira correta, é capaz de realizar conversões de dureza Vickers (HV10) para Rockwell C (HRC) seguindo a norma ISO 18265 (ISO, 2013) com resolução de 0,1 HRC. Para cada amostra, cinco medições de dureza foram realizadas.

e) *Determinação das propriedades mecânicas do aço AISI 4340*

O limite de escoamento, o limite de resistência e o módulo de elasticidade do aço AISI 4340 foram determinados por meio de ensaios de tração, executados conforme a norma ASTM E8/E8M (ASTM, 2018). Para tanto foi utilizada uma máquina de teste universal, da fabricante Instron®, modelo 8801, com faixa nominal de  $\pm 100$  kN. A Figura 3.5 mostra a geometria e as dimensões do corpo de prova para os ensaios de tração.

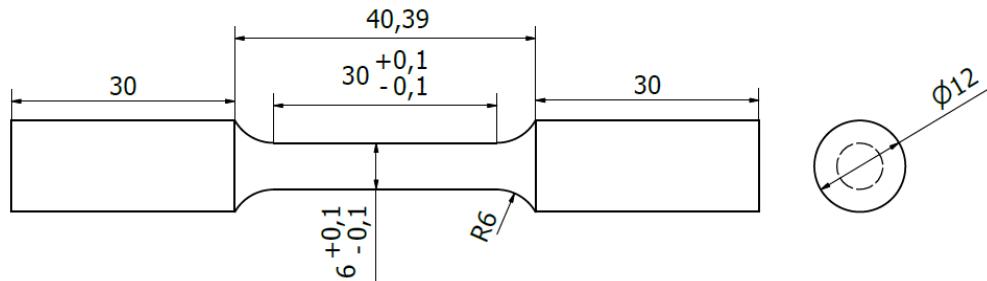


Figura 3.5 - Geometria e dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.

Após a usinagem, essas barras foram tratadas termicamente e uma amostra foi retirada para medição de dureza. As barras passaram, então, por uma operação de torneamento em um torno CNC do fabricante ROMI, modelo GL 240 M. Em seguida, cada corpo de prova teve o diâmetro da seção útil medido cinco vezes ao longo do seu comprimento, utilizando um paquímetro digital do fabricante Mitutoyo. Esse instrumento possui uma resolução de 0,01 mm, faixa nominal de 150 mm. O certificado de calibração (ANEXO A) declara uma incerteza associada à calibração do paquímetro de 0,01 mm para a realização de medições externas. A incerteza expandida associada ao desvio de paralelismo entre as superfícies para medições externas é de 0,01 mm. Em ambos os casos o fator de abrangência ( $k$ ) é igual a 2,00 e a probabilidade de abrangência de 95 %.

Os ensaios de tração foram realizados à temperatura de 22 °C e com uma taxa de carregamento igual a 1 mm/min até 4 % de deformação, e 2 mm/min para o restante do ensaio. A deformação do corpo de prova foi medida até aproximadamente o início da estrição utilizando um extensômetro eletromecânico axial da marca Instron®, modelo 2620-601, com faixa nominal de  $\pm 5$  mm e resolução de 0,01  $\mu$ m. Em seguida, o extensômetro eletromecânico foi removido e a deformação continuou sendo medida pelo RVDT integrado no equipamento até a ruptura do corpo de prova. O limite de escoamento, o módulo de elasticidade e o limite de resistência à tração foram obtidos por meio da curva tensão-deformação resultante dos ensaios.

### 3.2.2. Fabricação dos corpos de prova SNTT

O corpo de prova SNTT possui como característica principal a presença de um entalhe helicoidal ao longo de seu comprimento, região essa denominada de seção útil. O diâmetro da seção útil do corpo de prova SNTT foi definido tomando como base a capacidade dos gabaritos do extensômetro eletromecânico (10 ou 12 mm). Por sua vez, o diâmetro das extremidades do corpo de prova foi definido em função da capacidade das garras hidráulicas para fixação, a qual é de 15 mm. Em atendimento às recomendações do fabricante do sistema de ensaio utilizado, o comprimento das extremidades do corpo de prova foi definido como 30

mm. O fabricante recomenda que as garras devem prender no mínimo 25 mm das extremidades.

O passo do entalhe ( $p$ ) foi calculado como indica a Eq. (3.7). Este foi definido de forma tal que 75 % de seu comprimento se igualasse ao limite máximo do comprimento do extensômetro eletromecânico (25 mm). Esta prática tende a minimizar quaisquer influências das extremidades do entalhe no ângulo de torção.

$$p = \frac{25}{0,75} = 33,33 \text{ mm} \quad (3.7)$$

Em seguida foi determinada a relação  $a/D$  requerida ao final do processo de abertura de pré-trinca, de forma a garantir o ângulo de passo igual a  $45^\circ$ , como mostra a Fig. 3.6. A Equação (3.8) mostra como determinar o valor de  $a/D$ . Na Equação (3.8),  $p$  é o passo do entalhe,  $D$  é o diâmetro do corpo de prova e  $a$  é o comprimento total da trinca.

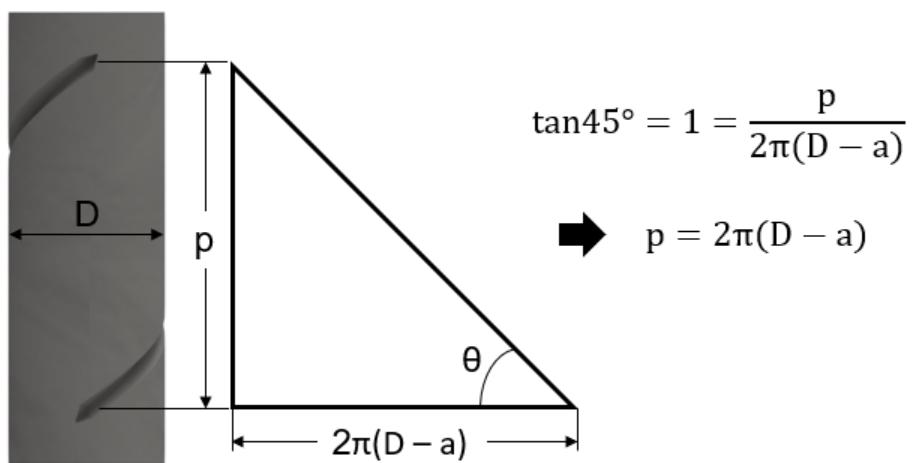


Figura 3.6 - Representação gráfica da relação entre  $a/D$  e o passo do entalhe para corpos de prova SNTT.

$$p = \pi D \left( 1 - \frac{a}{D} \right) \rightarrow \frac{a}{D} = 0,116 \quad (3.8)$$

Visando obter o valor previamente definido de  $a/D$  no final da abertura de pré-trinca e a nucleação e propagação da trinca, o corpo de prova deverá inicialmente apresentar um entalhe menos profundo ( $a_e$ ). Assim, foi definida uma relação  $a_e/D$  de 0,06, o que significa que o entalhe deverá possuir uma profundidade igual a 0,72 mm. As Figuras 3.7 e 3.8 mostram, respectivamente, os desenhos técnicos do corpo de prova SNTT projetado e de um corte

transversal de sua seção útil. Os demais detalhes referentes às dimensões do corpo de prova e às tolerâncias, foram definidos tomando como base os desenhos de Wang et. al (2012).

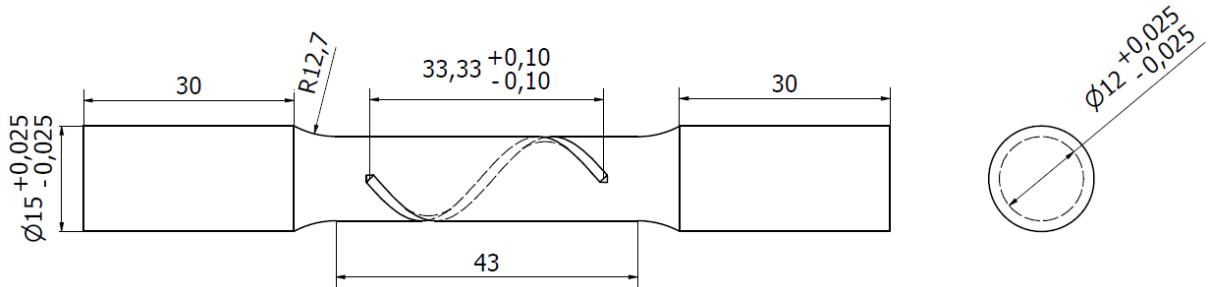


Figura 3.7 - Desenho técnico do corpo de prova SNTT projetado.

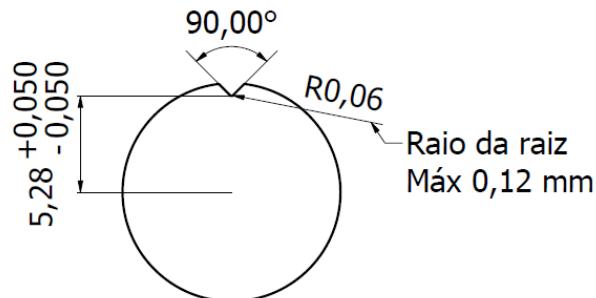


Figura 3.8 - Desenho técnico do corte transversal da seção útil do corpo de prova SNTT.

Adicionalmente, foi fabricado um corpo de prova SNTT com  $a_e/D = 0,116$ . O objetivo foi garantir o ângulo de passo de  $45^\circ$  e, consequentemente, o modo I puro, tomando os resultados destes ensaios como flexibilidade elástica de referência para os outros corpos de prova. A geometria é igual às apresentadas anteriormente, sendo a única diferença a profundidade do entalhe, como mostra a Fig. (3.9). Observe que a profundidade do entalhe é 1,39 mm, valor esse que corresponde a uma fração de 0,116 do diâmetro do corpo de prova.

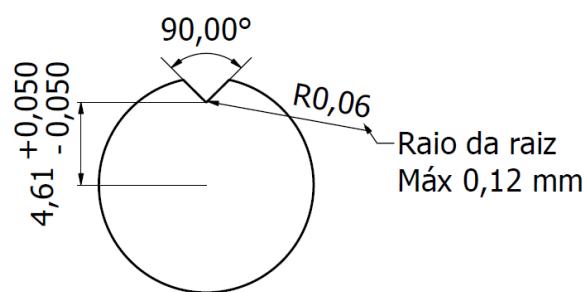


Figura 3.9 - Desenho técnico do corte transversal da seção útil do corpo de prova SNTT com  $a_e/D$  igual a 0,116.

Na fabricação dos corpos de prova SNTT em aço AISI 4340, barras cilíndricas com 15 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento foram retiradas da chapa utilizando uma máquina de eletroerosão da marca AgieCharmiles modelo FW2U, como mostra a Fig. (3.10). Após a usinagem, essas barras foram tratadas termicamente e uma amostra foi retirada para medição de dureza. Posteriormente, todas as barras foram levadas ao torno CNC da fabricante ROMI, modelo GL 240 M, onde passaram por uma etapa de usinagem final.

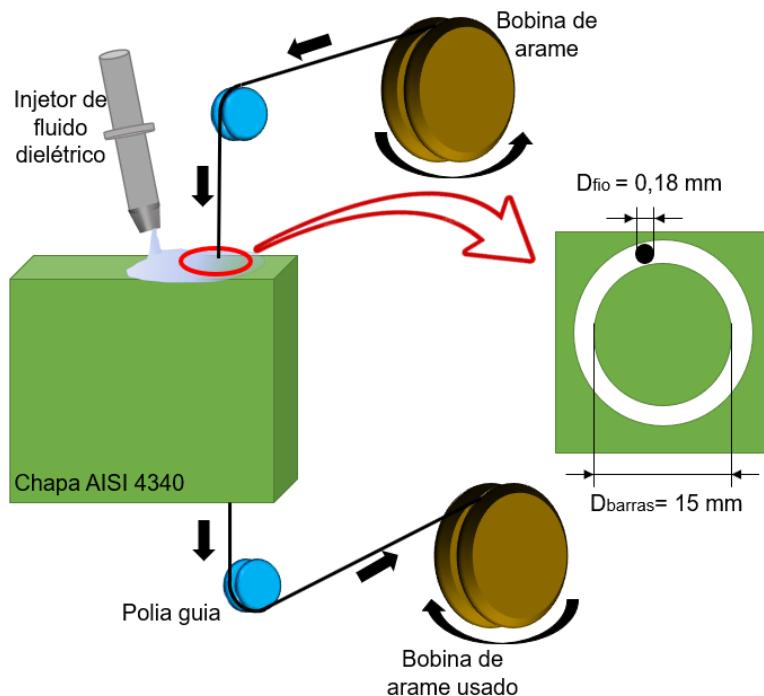


Figura 3.10 - Esquema representativo da retirada das barras cilíndricas para fabricação dos corpos de prova de SNTT.

### 3.2.3. *Ensaios com corpos de prova SNTT*

Os ensaios nos corpos de prova SNTT foram divididos em duas etapas, quais sejam: ensaio preliminar e ensaios definitivos. Em ambos os casos foram feitas marcações nas extremidades dos corpos de prova SNTT, como mostra a Fig. 3.11, a fim de garantir que os comprimentos dos corpos de prova entre garras hidráulicas fossem similares.

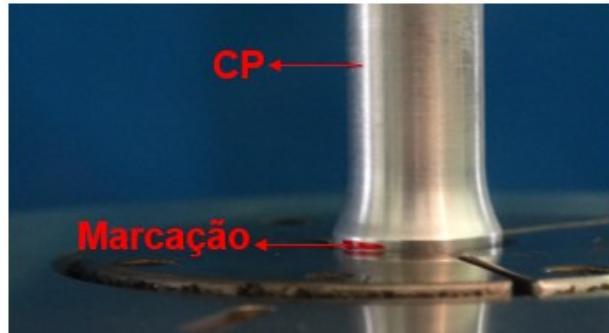


Figura 3.11 - Marcação indicando o comprimento do corpo de prova que deve ser fixado pelas garras.

O ensaio preliminar teve como objetivo simular uma trinca com comprimento igual ao requerido no final do processo da abertura da pré-trinca. Para tanto, um corpo de prova com  $a_e/D = 0,116$  foi submetido a um carregamento monotônico crescente com taxa de carregamento constante de 5 N.m/min. A faixa de torque aplicada, 0 – 80 N.m, foi calculada de forma tal que o material se mantivesse no estado linear elástico, isto é, sem se deformar plasticamente.

Como resultado do ensaio, foi possível determinar a relação existente entre os ângulos de torção medidos pelo extensômetro eletromecânico ( $\theta_{extens.}$ ) e pelo RVDT ( $\theta_{RVDT}$ ). Desta forma, nos ensaios definitivos, foi possível calcular  $\theta_{extens}$  em função de  $\theta_{RVDT}$  (já que no carregamento monotônico não é possível à utilização do extensômetro eletromecânico). Vale lembrar que o extensômetro eletromecânico permite medir de forma direta o ângulo de torção do corpo de prova ( $\theta_{CP}$ ), fato esse que não ocorre nas medições com o RVDT. Esse ensaio permitiu, também, obter equações empíricas, as quais, assim como as Eqs. (3.3) a (3.5), permitem calcular o ângulo de torção a ser definido como critério de parada para a abertura de pré-trinca dos ensaios definitivos.

Os ensaios definitivos foram conduzidos aplicando a metodologia proposta e os resultados obtidos no ensaio preliminar. Os corpos de prova ensaiados nessa etapa foram aqueles com  $a_e/D = 0,06$ .

A estimativa de  $K_{IC}$  para o material ensaiado foi de  $100 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Em seguida, considerando um  $K$  igual a 60 % da estimativa para  $K_{IC}$  do material testado, foram calculados, por meio das Eqs. (3.3) a (3.5), os torques a serem aplicados durante o ciclo de fadiga ( $T_{máx}$  e  $T_{min}$ ). Adicionalmente, foi determinado o ângulo de torção final ( $\theta_{final\_calc.}$ ) da abertura de pré-trinca (critério de parada) para os corpos de prova. Além disso, por meio das equações empíricas obtidas no ensaio preliminar, foi determinado o valor do ângulo de torção final empírico ( $\theta_{final\_exp.}$ ). Nos cálculos, o torque considerado em ambos os casos foi o  $T_{máx}$  definido para o ciclo de fadiga. A frequência de fadiga foi definida em função da resposta entre o valor do torque definido e o obtido, buscando sempre a maior frequência para obtenção do tamanho

de trinca definido no menor tempo possível, então, os corpos de prova foram submetidos à abertura de pré-trinca. A Tabela 3.1 mostra os parâmetros aplicados para a abertura de pré-trinca dos corpos de prova fabricados em aço AISI 4340.

Tabela 3.1 - Parâmetros aplicados para abertura da pré-trinca dos corpos de prova de aço AISI 4340.

	$T_{máx}$ (N.m)	$T_{mín}$ (N.m)	$f$ (Hz)	$\theta_{final\_calc.}$ (°)	$\theta_{final\_exp}$ (°)
AISI 4340	185	18,5	5	2,32	2,16

Para os corpos de prova fabricados em AISI 4340, o  $\theta_{final\_calc}$  se mostrou maior que o  $\theta_{final\_exp}$ . Dessa forma, a fim de obter resultados conservadores para o comprimento da trinca obtido ao final da abertura de pré-trinca, foi definido que o ângulo a ser tomado como critério de parada seria  $\theta_{final\_exp}$ . A Figura (3.12) mostra um corpo de prova SNTT posicionado no sistema de ensaio durante a abertura de pré-trinca.

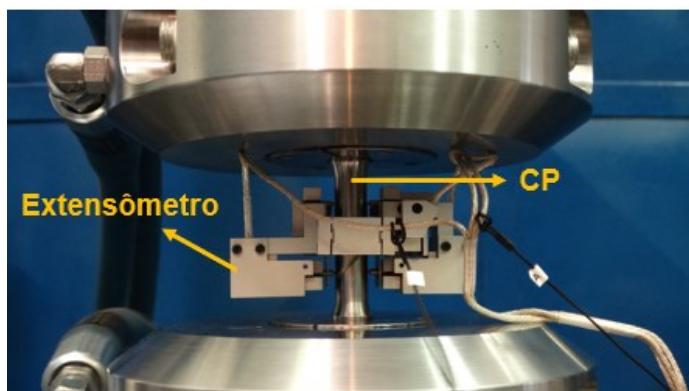


Figura 3.12 - Corpo de prova SNTT posicionado no sistema de ensaio, com o extensômetro eletromecânico acoplado.

Após realizada a abertura e propagação da pré-trinca por fadiga, o carregamento monotônico foi executado em cada um dos corpos de prova até a fratura destes. A taxa de carregamento aplicada foi de 20 N.m/min. Com os corpos de prova fraturados, foram determinados o torque e o ângulo de torção do corpo de prova. Além disso, a superfície de fratura foi analisada em um estéreo microscópio da fabricante Opticam optzs, modelo LOPT 14003, com resolução de 0,001 mm para medição do comprimento da pré-trinca por fadiga. Foram realizadas 10 medições distribuídas uniformemente ao longo da superfície de fratura do corpo de prova. Por fim, a tenacidade à fratura foi determinada por meio das Eqs. (3.3) e (3.5).

Visando identificar os mecanismos de fratura, as regiões de pré-trinca e de fratura de um corpo de prova SNTT e de um C(T) foram analisadas por meio de um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução (MEV/FEG – *Field Emission Gun*) da marca Zeiss®, modelo Supra 40. Adicionalmente, o corpo de prova SNTT foi analisado considerando três seções, distribuídas entre a seção da fratura e a extremidade do entalhe, como mostra a Fig. 3.13.

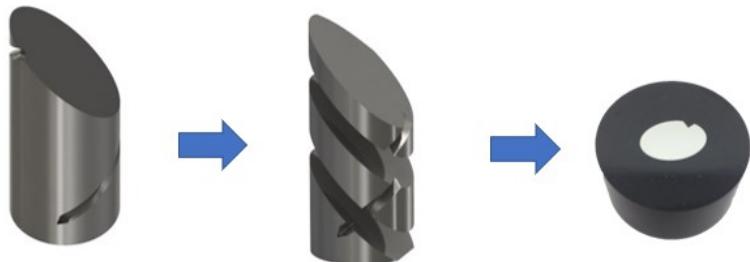


Figura 3.13 - Esquema representativo da do corte do corpo de prova para análise no MEV.

### 3.2.4. Medição da deformação dos corpos de prova via extensômetro eletro-resistivo

De acordo com Grante (2004), em ensaios torcionais, para medição do ângulo de torção de uma região qualquer de um corpo de prova, deve ser medida a deformação a 45°. Essa deformação está relacionada ao ângulo de torção por meio da Eq. (3.9).

$$\theta_{CP} = 2 \frac{\varepsilon_{45^\circ} \cdot L}{r} \quad (3.9)$$

Na Equação (3.9),  $\theta_{CP}$  é o ângulo de torção do corpo de prova na região do entalhe,  $\varepsilon_{45^\circ}$  é a deformação medida a 45°,  $L$  é o comprimento da região desejada para realizar a medição do ângulo e  $r$  é o raio do corpo de prova na seção útil.

Extensômetros eletro-resistivos tipo Roseta Miniatura do fabricante HBM, modelo RF9, com três grades de medição sobrepostas de comprimento igual a 0,8 mm foram utilizados para medição da deformação dos corpos de prova SNTT. Foi realizada a medição no ensaio preliminar e em um dos ensaios definitivos. Os extensômetros eletro-resistivos colados na superfície do corpo de prova foram utilizados como alternativa ao extensômetro eletromecânico MTS. Durante o ensaio, eles foram colados como mostra a Fig. 3.14.

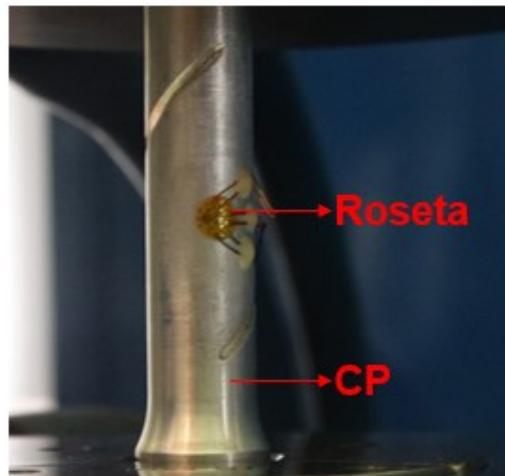


Figura 3.14 - Corpo de prova (CP) com Roseta colada no centro do entalhe.

Vale ressaltar que esse tipo de extensômetro eletro-resistivo possui uma grade de medição reduzida permitindo efetuar uma medição quase pontual no corpo de prova. Ainda, a vida em fadiga desse extensômetro eletro-resistivo é relativamente baixa, cerca de  $10^4$  ciclos, e, portanto, não deve ser utilizado no processo de abertura de pré-trinca. Os valores da deformação dos corpos de prova indicados pelos extensômetros eletro-resistivos foram utilizados para calcular  $\theta_{CP}$ . Estes valores de ângulo de torção foram, então, comparados com aqueles calculados considerando a relação entre RVDT e extensômetro eletromecânico. No cálculo de  $\theta_{CP}$  foi considerado  $L = 33,33$  mm ( $p$ ).

### 3.3. Validação da metodologia proposta

A validação da metodologia proposta foi realizada por meio da comparação dos valores de  $K_{IC}$  decorrentes do ensaio SNTT e aqueles resultantes da aplicação do método convencional, regulamentado pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019). Como referência foram utilizados os valores de  $K_{IC}$  resultantes de ensaios em corpos de prova do tipo compacto por tração (C(T)). A validação foi baseada em um planejamento fatorial simples, onde o fator método foi avaliado em dois níveis, como mostra a Tab. 3.2. Para o fator método foram avaliados o método convencional e o método SNTT.

Tabela 3.2 - Matriz de planejamento fatorial simples.

Experimento	Método
1	Convencional (ASTM E399)
2	SNTT

Em cada condição três testes foram conduzidos. O tratamento dos dados foi efetuado utilizando-se a técnica estatística de Análise de Variância (ANOVA), por meio do *software* Statistica 7.0. O objetivo da aplicação desta técnica foi o de identificar se os métodos investigados produzem efeitos com confiabilidade estatística na variável resposta,  $K_{IC}$ .

Para avaliar o desempenho metrológico do método de ensaio convencional foi determinado o erro sistemático associado à  $K_{IC}$ . Também foram avaliadas a repetibilidade e a incerteza padrão associada aos valores de  $K_{IC}$  fornecidos por ambos os métodos. Por fim, para o método convencional, foi determinado o erro máximo.

### 3.3.1. Obtenção dos valores de referência por meio do método convencional – corpos de prova C(T)

A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) define as dimensões do corpo de prova C(T) em função das propriedades mecânicas do material ensaiado: limite de escoamento e tenacidade à fratura, como mostra a Eq. (3.10). A espessura do material,  $B$ , é utilizada como base para cálculo das demais dimensões.

$$a, B, (W - a) \geq 2,5 \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10),  $a$  representa o comprimento da trinca,  $B$  é a espessura do corpo de prova,  $(W - a)$  é o ligamento do corpo de prova,  $\sigma_{ys}$  é o limite de escoamento do material e  $K_{IC}$  é a tenacidade à fratura. Essa equação deve ser respeitada, pois dessa forma há a garantia de que na ponta da trinca existe um estado plano de deformação.

A Figura 3.15 mostra o desenho técnico do corpo de prova C(T) a ser ensaiado neste trabalho. Para fabricação destes, blocos com  $64,0 \times 61,5 \times 30,0 \text{ mm}^3$  foram retirados da chapa de aço AISI 4340, por meio da máquina de eletroerosão especificada anteriormente. Um fio de molibdênio com diâmetro de 0,18 mm foi utilizado. Três blocos foram retirados, sendo dois no plano T-L e outro no plano L-T, como mostra a Fig. 3.16.

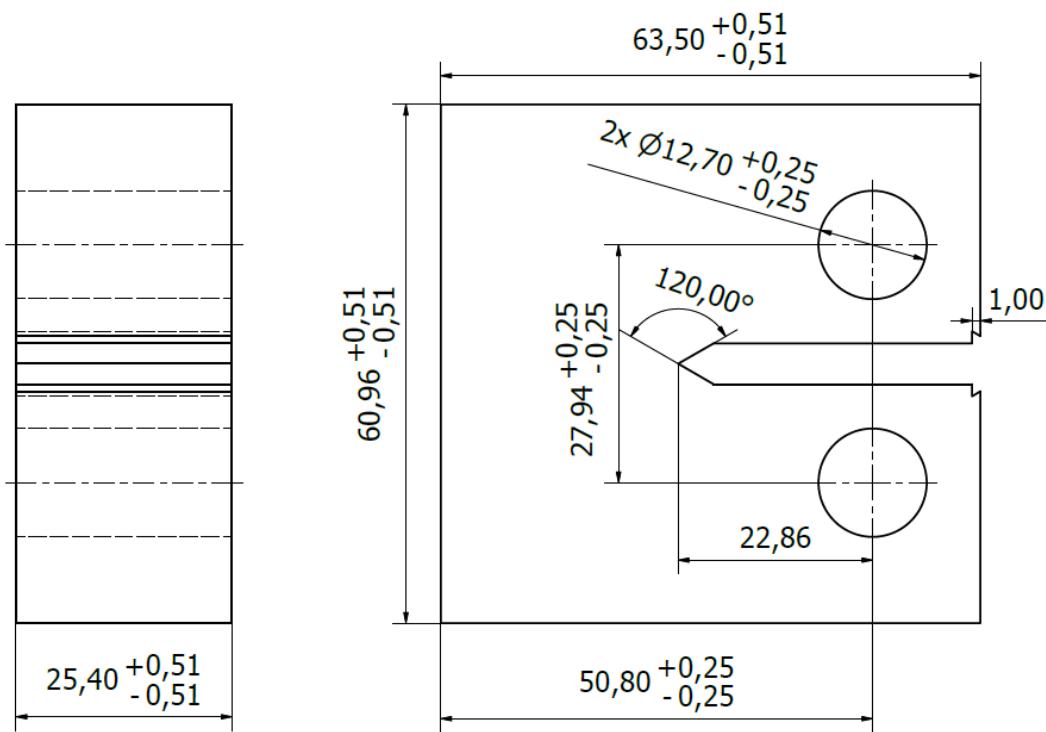


Figura 3.15 - Geometria e dimensões do corpo de prova C(T) para uma espessura  $B$  igual a 25,4 mm.

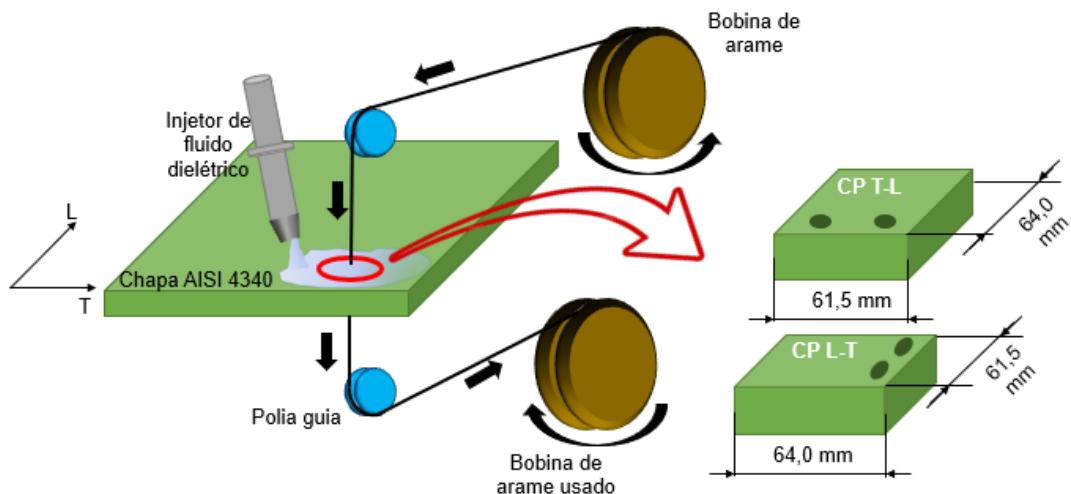


Figura 3.16 - Esquema representativo da retirada dos blocos para fabricação dos corpos de prova C(T).

Após a retirada dos blocos, foi realizado o tratamento térmico, e em sequência um processo de retificação, por meio de uma retífica Yadoya RG-280, obtendo, ao final desse processo, as dimensões finais de projeto. Para verificar a eficiência do tratamento térmico, um dos corpos de prova passou por um ensaio de dureza. Com a especificação de projeto para

a dureza atendida, os blocos passaram novamente por uma operação de eletroerosão para finalização da usinagem.

Para a realização dos ensaios de acordo com a norma ASTM E399 (ASTM, 2019), foi utilizada uma máquina teste universal servohidráulica Instron®, modelo 8801, com capacidade de  $\pm 100$  kN. A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) regulamenta a abertura de uma pré-trinca por fadiga e, posteriormente, o carregamento monotônico até a falha do corpo de prova. Também foi utilizado para medição do deslocamento da abertura do entalhe, um extensômetro eletromecânico da fabricante Instron®, modelo CP117855, com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$  e com leitura máxima de deslocamento igual a 4 mm.

A abertura inicial máxima do extensômetro eletromecânico é de 4 mm e a abertura do entalhe dos corpos de prova é de 4,78 mm. Portanto, foi necessário fabricar facas (*knives edges*), como previsto na ASTM E399 (ASTM, 2019). Elas possuem a função de fixar o extensômetro eletromecânico (*clip-on gauges*) para medir a abertura da boca do entalhe (Fig. 3.17).

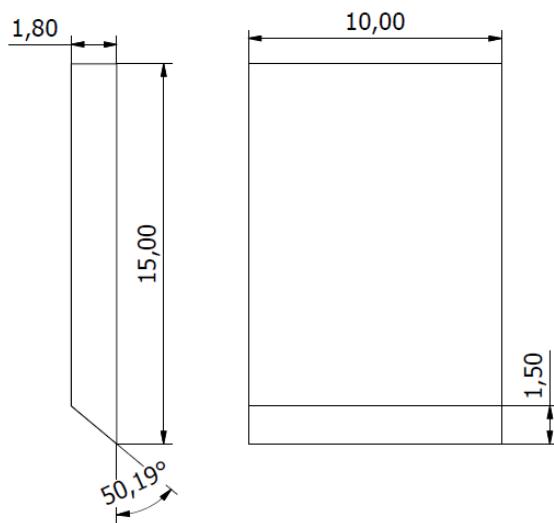


Figura 3.17 - Desenho técnico das facas seguindo as recomendações da norma ASTM E399 (ASTM, 2019).

Para fixação das facas aos corpos de prova, foi utilizada uma supercola líquida. Cuidados adicionais foram tomados durante o processo de colagem visando garantir o paralelismo entre as duas faces das facas onde o extensômetro eletromecânico foi encaixado. A Figura 3.18 mostra o corpo de prova C(T) posicionado na máquina de teste com as facas coladas à sua superfície superior, e com o extensômetro eletromecânico acoplado.

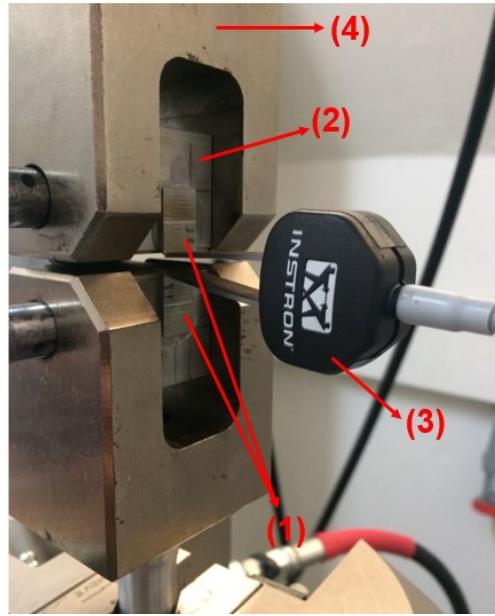


Figura 3.18 - Facas (1), corpo de prova C(T) (2), extensômetro eletromecânico acoplado ao corpo de prova (3) e garras de fixação (4).

O controle da pré-trinca por fadiga foi realizado por meio da flexibilidade elástica do corpo de prova. Para tanto, utilizou-se uma variação do fator de intensidade de tensão ( $\Delta K = K_{MAX} - K_{MIN}$ ) constante igual a  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . A razão ( $K_{MAX}/K_{MIN}$ ) adotada foi de 0,1, ondas do tipo senoidal e uma frequência de 10 Hz foram utilizadas. Para controle visual do crescimento da trinca, a região próxima à ponta do entalhe de todos os corpos de prova foi polida. Em seguida foi feita uma marcação por meio de um traçador de alturas na posição que representa a relação  $a = 0,54W$ . É importante ressaltar que essa marcação foi feita de forma específica para cada corpo de prova, visto que estes possuem  $W$  diferentes. A Figura 3.19 mostra a região polida com a marcação que indica  $a/W = 0,54$ .

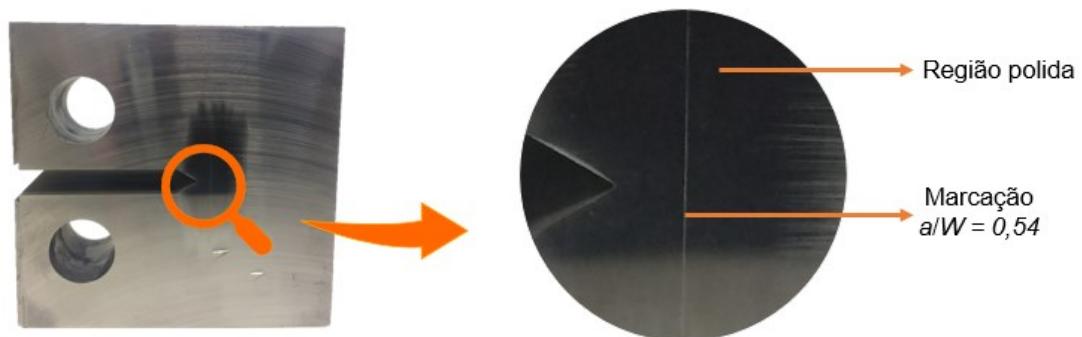


Figura 3.19 - Corpo de prova C(T) com a região próxima ao entalhe polida e com a marcação que representa  $a/W$  igual a 0,54.

Após a abertura e propagação da trinca, os corpos de prova foram tracionados até a fratura completa. A taxa de carregamento aplicada foi de 0,01 kN/min (1 MPa $\sqrt{m/s}$ ), estando esse valor, dentro dos limites especificados pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019). Como resultado, é obtida a curva carga ( $P$ ) versus deslocamento ( $\Delta l$ ) durante o ensaio.

Após os ensaios, o comprimento da pré-trinca por fadiga nas superfícies de fratura expostas foi medido, conforme mostra a Fig. 3.20, seguindo as recomendações da norma ASTM E399 (ASTM, 2019). Para tanto, foi utilizado um projetor de perfil, marca Mitutoyo, modelo PJA3000, com uma lente de ampliação de 10X. Para as medições lineares, a resolução é de 0,001 mm. O certificado de calibração do projetor de perfil, ANEXO B, declara uma incerteza expandida associada à calibração para medidas lineares utilizando o eixo Y de 0,002 mm. O fator de abrangência ( $k$ ) é igual a 2,03 com 99 graus de liberdade efetivos. Este certificado declara também a incerteza associada ao aumento da lente, como sendo 0,01 % do valor do mensurando, para um fator de abrangência ( $k$ ) igual a 2,00. Para cada uma das localidades indicadas na Fig. 3.20 (1 a 5), foram realizadas cinco medições.

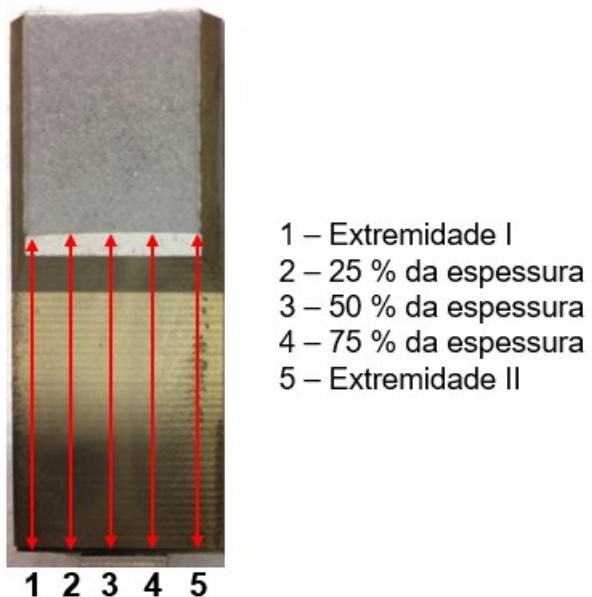


Figura 3.20 - Esquema representativo da medição do comprimento da pré-trinca por fadiga na superfície exposta dos corpos de prova C(T).

De posse dos valores do comprimento das trincas para todos os corpos de prova, bem como as propriedades mecânicas do material foi verificada a validade dos ensaios. Para tanto o valor de  $K_q$  (valor provisório de  $K_{IC}$ ) do aço AISI 4340 foi determinado utilizando o software  $K_{IC}$  CTOD Fracture Toughness da máquina universal de ensaios Instron®. Se os ensaios forem válidos então pode-se assumir que  $K_q = K_{IC}$ .

A verificação da validade dos resultados dos ensaios nos corpos de prova C(T), requer o cálculo da relação entre os valores de cargas, quais sejam: carga máxima ( $P_{MAX}$ ) e carga

obtida por meio de um deslocamento secante de 5 % da inclinação inicial da curva ( $P_Q$ ). Esse deslocamento representa aproximadamente 2 % da propagação aparente da trinca. A relação entre essas grandezas não poderá exceder 1,10 (Eq. 3.11). Adicionalmente, o atendimento da Eq. (3.10) deve ser verificado, considerando o valor de  $K_Q$  resultante dos ensaios. Desta forma, verifica-se se a espessura do corpo de prova  $B$  especificada em projeto é adequada.

$$\frac{P_{MAX}}{P_Q} \leq 1,10 \quad (3.11)$$

### 3.4 Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova

O controle dimensional e geométrico dos corpos de prova C(T) e SNTT foi realizado utilizando os sistemas de medição mostrados na Tab. 3.3.

Tabela 3.3. Sistemas de medição utilizados na medição dos diversos mensurandos.

Diâmetro dos furos ( $F_1$ e $F_2$ ), Distância entre os furos ( $Dist.$ ) e largura ( $W$ ) dos corpos de prova C(T)	Máquina de medir por coordenadas
Comprimento do entalhe do corpo de prova C(T) ( $a_e$ ) e passo do entalhe do corpo de prova SNTT ( $p$ )	Projetor de perfil
Comprimentos maior ( $C_1$ ), menor ( $C_2$ ) e espessura do corpo de prova C(T) ( $B$ )	Paquímetro digital
Diâmetros das cabeças de fixação ( $D_{g1}$ e $D_{g2}$ ) e diâmetro da seção útil do corpo de prova SNTT ( $D$ )	Micrômetro digital
Profundidade do entalhe do corpo de prova SNTT ( $a_e$ )	Interferômetro laser

A máquina de medir por coordenadas (MMC) utilizada é do fabricante Mitutoyo®, modelo BRM443, tipo ponte móvel, manual. Esta máquina possui uma resolução de 0,001 mm e um volume de trabalho máximo de 400 mm x 400 mm x 300 mm, definido pela faixa nominal das escalas dos eixos X, Y e Z, respectivamente. O *software* dedicado à máquina é o MCosmos® 3.0, que permite o gerenciamento de todas as tarefas de medição. De acordo com o certificado de calibração da MMC, ANEXO C, a incerteza linear associada ao eixo X é

$(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$  ( $k = 2,03$ ), para o eixo Y é  $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$  ( $k = 2,08$ ), enquanto que para o eixo Z é  $(0,9 + L/2900) \mu\text{m}$  ( $k = 2,11$ ), onde  $L$  representa o valor da coordenada correspondente. O erro de apalpação é de  $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$  ( $k = 2,00$ ) e a probabilidade de abrangência é de 95 %.

Para as medições realizadas com a MMC, transferiu a origem do sistema de coordenadas da máquina foi transferida para a peça como indica a Fig. 3.21. Durante a medição foi utilizada uma ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro. Em cada plano considerado foram apalpados 10 pontos distribuídos de forma uniforme. Na medição do diâmetro dos furos foram apalpados 8 pontos, distribuídos aleatoriamente em uma seção transversal deste.



Figura 3.21 - Posicionamento da origem do sistema de coordenadas para as medições do corpo de prova C(T) com a MMC.

O micrômetro digital para medições externas utilizado é da marca Mitutoyo®, modelo MDC-Lite, resolução de 0,001 mm e faixa nominal de 25 mm. De acordo com o certificado de calibração, ANEXO D, a incerteza expandida associada à calibração é de 0,001 mm e o fator de abrangência ( $k$ ) igual a 2,00 com 95 % de probabilidade de abrangência. Para os desvios de paralelismo das faces de medição e planeza da face do fuso, as incertezas expandidas associadas são, respectivamente, 0,0003 mm e 0,0002 mm. Para ambos os casos o fator de abrangência ( $k$ ) igual a 2,00 com 95 % de probabilidade de abrangência.

Nas medições realizadas com o projetor de perfil, foi utilizada uma lente com aumento de 10X e o deslocamento do corpo de prova foi realizado na direção do eixo Y. A Figura 3.22 mostra a imagem projetada na tela do projetor do corpo de prova SNTT durante a medição do passo do entalhe.

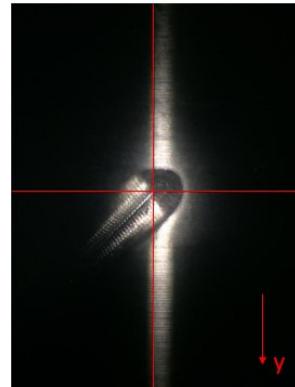


Figura 3.22 - Posicionamento do ponto central da tela de medição do projetor de perfil para a medição do passo do entalhe.

O interferômetro laser utilizado é do fabricante Taylor Robson®, modelo Talysurf CLI 2000, com auxílio do programa Talysurf CLI 2000. Durante a medição foi utilizada luz laser, que permite efetuar medições de comprimentos com resolução de 0,001 mm. O certificado de calibração (ANEXO E) declara uma incerteza expandida de  $\pm 0,30 \mu\text{m}$  para  $R_a = 6,00 \mu\text{m}$ , o que representa uma incerteza em porcentagem igual a 5 %.

Durante a medição da profundidade do entalhe foi adotada velocidade de varredura de 500  $\mu\text{m/s}$  e um comprimento de medição de 8 mm foi apalpado. A Figura 3.23 mostra um perfil obtido durante a medição da profundidade de um corpo de prova SNTT. A profundidade foi determinada seis vezes, considerando um ponto posicionado na raiz do entalhe e seis pontos na superfície do corpo de prova, três em cada lado.

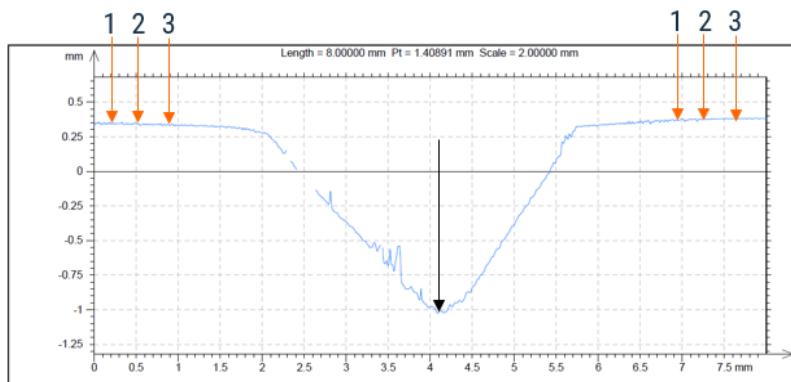


Figura 3.23 - Perfil do entalhe do corpo de prova SNTT obtido por interferometria a laser indicando o procedimento de medição.

A temperatura ambiente foi mantida em  $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$ . Para todas as medições a temperatura foi monitorada por meio de um termo-higrômetro digital com resolução de  $0,1 ^\circ\text{C}$  e faixa nominal de  $(-20,0 \text{ a } 60,0) ^\circ\text{C}$ . O certificado de calibração do termo-higrômetro (ANEXO F) declara uma incerteza expandida de  $0,3 ^\circ\text{C}$  para  $k$  igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade

para a medição da temperatura. Tanto os corpos de prova quanto os dispositivos de medição foram deixados doze horas à temperatura ambiente para atingirem o equilíbrio térmico.

Para todos os mensurandos, foram realizados cinco ciclos de medição e determinadas as incertezas expandidas associadas às medições. Os resultados obtidos para os corpos de prova C(T) e SNTT são apresentados nos APÊNDICES I e II, respectivamente.

### 3.5 Avaliação da incerteza de medição

A incerteza associada à medição dos diversos mensurandos avaliados durante o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova, na caracterização do material e no cálculo de  $K_{IC}$  foi avaliada por meio da aplicação dos métodos GUM e Monte Carlo, propostos pelo INMETRO (2012) e pelo JCGM 101 (BIPM et al., 2008), respectivamente. A seguir são apresentados apenas os modelos matemáticos utilizados em cada caso, uma vez que estes mensurandos são amplamente abordados na literatura, Tab. 3.4.

Tabela 3.4 – Modelos matemáticos para avaliação da incerteza associada aos mensurando avaliados durante o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova.

Mensurando	Sistema de medição	Modelos matemáticos
Diâmetro do furo e largura dos corpos de prova C(T)	Máquina de medir por coordenadas	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta E_a$
Dureza Rockwell C	Durômetro	
Composição química	Espectrômetro	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C$
Profundidade do entalhe	Interferômetro laser	
Comprimento do entalhe do corpo de prova C(T), passo do entalhe do corpo de prova SNTT e comprimento da pré-trinca do corpo de prova C(T)	Projetor de perfil	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta A$
Comprimentos maior, menor e espessura do corpo de prova C(T)	Paquímetro	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta DP$
Diâmetro da cabeça de fixação e diâmetro da seção útil do corpo de prova SNTT	Micrômetro	$M = \bar{X} + \Delta R + \Delta C + \Delta DP + \Delta DPF + \Delta DPM$

Nas equações presentes na Tab. 3.4,  $M$  representa o mensurando em questão,  $\bar{X}$  denota a média aritmética dos valores obtidos durante a medição em questão,  $\Delta R$  representa a correção devida à resolução do sistema de medição utilizado,  $\Delta C$  representa a correção devida à calibração da máquina de medir por coordenadas,  $\Delta E_a$  indica a correção associada ao erro de apalpamento,  $\Delta A$  é a correção devida à ampliação da objetiva utilizada,  $\Delta DP$  é a correção devida ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição do sistema de medição em questão, e  $\Delta DPF$  e  $\Delta DPM$  representam as correções devida ao desvio de planeza da superfície do batente e do fuso, respectivamente.

### 3.5.1 Avaliação da incerteza associada à $K_{IC}$ determinado pelo método SNTT

Para avaliar a incerteza associada à  $K_{IC}$  determinado pelo método SNTT, foi utilizado o método de Monte Carlo apresentado no JCGM 101 (BIPM et al., (2008). As Equações (3.5) e (3.7) foram utilizadas como base para propagação das distribuições. Durante a aplicação do método de Monte Carlo para estimar a incerteza associada ao  $G$  e, posteriormente, ao  $K_{IC}$  foram realizadas 1 000 000 de interações. A simulação foi conduzida por meio do Microsoft Excel® 2019. Durante a simulação foram adotadas distribuições normais de probabilidade para todas as variáveis de entrada. Os valores de *Skewness* e *Kurtosis* de  $G$  e de  $K_{IC}$  resultantes da simulação foram determinados, bem como a média e o desvio padrão. Finalmente, considerando distribuições normais e simétricas determinou-se o valor da incerteza expandida associada a  $G$  e  $K_{IC}$  por meio da Eq. (3.12).

$$U(x) = 2,00 \cdot s(x) \quad (3.12)$$

Na Equação (3.12),  $U(x)$  é a incerteza expandida associada ao mensurando,  $s(x)$  é o desvio padrão obtido a partir dos valores simulados e 2,00 é o valor do fator de abrangência recomendado pelo JCGM 101 (BIPM et al., (2008). Maiores informações podem ser encontradas em Rodrigues et al., (2019).

Para determinar a incerteza associada a cada uma destas variáveis de entrada foi aplicado o método GUM, proposto no INMETRO (2012). Os modelos matemáticos adotados são mostrados na Tab. 3.5.

Tabela 3.5 – Modelos matemáticos das variáveis de entradas (mensurandos) para determinação da tenacidade à fratura.

Mensurando	Sistema de medição	Modelos matemáticos
Torque	Torquímetro	$T = \bar{T} + \Delta R + \Delta C$
Ângulo de torção do corpo de prova	Extensômetro eletromecânico	$\theta = \bar{\theta} + \Delta R + \Delta C$
Comprimento total da trinca	-----	$a = a_e + a_{pt}$
Área	-----	$A = \frac{\pi D^2}{4}$

Nos modelos matemáticos da Tab. 3.5,  $\bar{T}$  e  $\bar{\theta}$  representam a variabilidade associada às medições de cada um dos mensurandos,  $\Delta R$  é a correção associada à resolução do sistema de medição,  $\Delta C$  é a correção associada à calibração do sistema de medição,  $D$  é o diâmetro do corpo de prova,  $a_e$  é a profundidade do entalhe,  $a_{pt}$  é o comprimento da pré-trinca e  $a$  é o comprimento total da trinca. Vale ressaltar que o modelo matemático do diâmetro, da profundidade do entalhe e do comprimento da pré-trinca do corpo de prova SNTT foram devidamente definidos na Tab. 3.4.

### 3.6 Detalhadamento da metodologia proposta

A metodologia para determinação de  $K_{IC}$  utilizando o método SNTT se baseia nos modelos analíticos obtidos por Wang et al. (2014) via simulação tridimensional de um corpo de prova SNTT em diferentes condições (torque aplicado, ângulo de torção e comprimento de pré-trinca).

O método SNTT pode ser dividido em duas etapas: processo de abertura de pré-trinca por fadiga e carregamento monotônico. De acordo com ASTM E399 (ASTM, 2019), a presença de uma trinca real no corpo de prova simula de forma realística componentes estruturais que possuem uma trinca em condições de serviço. Após a nucleação e propagação da pré-trinca, o corpo de prova é submetido a uma torção monotônica gradual até a ocorrência da fratura, como mostra a Fig. 3.24.

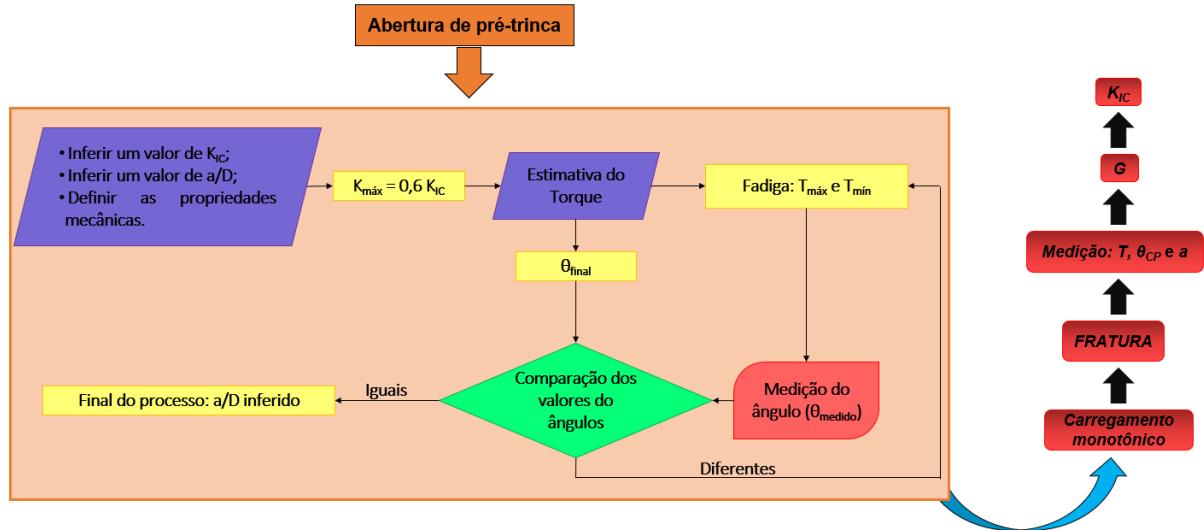


Figura 3.24 – Aplicação do método SNTT.

De posse da metodologia proposta, foi definida uma rotina detalhada para realização dos ensaios SNTT:

i) Procedimento de abertura de pré-trinca por fadiga

- Inferir um valor aproximado do  $K_c$  dos materiais testados.
- Definir a relação comprimento de trinca e diâmetro ( $a/D$ ), sendo  $a$  o comprimento de trinca e  $D$  diâmetro do corpo de prova.
- Determinar as propriedades do material ( $E$  - Módulo de elasticidade,  $\nu$  - Coeficiente de Poisson e  $\mu$  - Módulo de cisalhamento).
- Determinar o passo do entalhe do corpo de prova ( $p$ ) como indicado na Fig. 3.25.

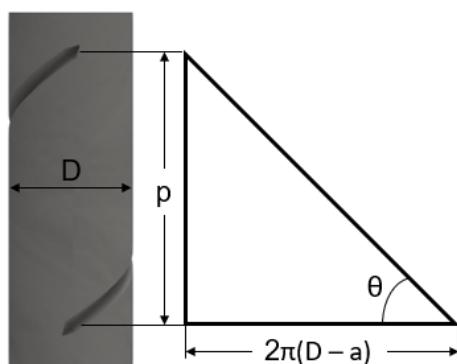


Figura 3.25 - Procedimento de determinação do passo do entalhe do corpo de prova.

Sabendo que o ângulo  $\theta = 45^\circ$  e que a  $\tan(45^\circ) = 1$  pode se determinar  $p$  por meio das Eqs. (3.13) e (3.14). O valor de  $p$  é assim determinado de forma a garantir a dominância do modo I (modo de abertura) na frente da trinca.

$$\tan(45^\circ) = 1 = \frac{p}{\pi(D-a)} \quad (3.13)$$

$$p = \pi(D-a) \quad (3.14)$$

e) Determinar o torque necessário para desenvolver um fator de intensidade de tensão máximo na frente da trinca ( $K_{max}$ ), como mostrado na Eq. (3.15). O valor de  $K_{max}$  deve ser 60 % do valor inferido de  $K_{IC}$  na etapa a), assim como o recomendado pela norma ASTM E399 (ASTM, 2019). A Equação (3.15) é utilizada juntamente com as Eqs. (3.16) e (3.17). A razão de tensão durante o processo de pré-trincamento,  $R$ , é igual a 0,1.

Sabendo a relação entre  $G$  e  $K$ :

$$G = K^2 \frac{(1-\nu^2)}{E} \quad (3.15)$$

O torque pode ser avaliado por:

$$T = \frac{8.G.A}{\theta_{CP} \left(1 - \frac{a}{D}\right)^2} \cdot \frac{1}{-154,56 \left(\frac{a}{D}\right)^4 + 188,95 \left(\frac{a}{D}\right)^3 - 63,398 \left(\frac{a}{D}\right)^2 + 20,626 \left(\frac{a}{D}\right) - 0,4716} \quad (3.16)$$

e o ângulo de torção por

$$\theta_{CP} = \frac{T.p}{\mu \left(1 - \frac{a}{D}\right)^4} \cdot \left[ 3,3445 \left(\frac{a}{D}\right)^4 - 5,2514 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + 4,0568 \left(\frac{a}{D}\right)^2 - 2,2298 \left(\frac{a}{D}\right) + 0,6226 \right] \quad (3.17)$$

Nas Equações (3.15) a (3.17),  $T$  é o torque aplicado,  $\gamma$  é a deformação angular unitária,  $G$  é a taxa de liberação de energia,  $A$  é a área da seção transversal do corpo de prova,  $\theta_{CP}$  é o ângulo de torção do corpo de prova,  $a$  é o comprimento da trinca,  $D$  é o diâmetro do corpo

de prova e  $p$  é o passo do entalhe do corpo de prova.  $E$ ,  $\mu$  e  $\nu$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson do material.

f) Determinar o ciclo de fadiga em termos dos valores de máximo e mínimo do torque aplicado ( $R = 0,1$ ).

g) Calcular o ângulo de torção final aplicado ( $\theta_{final}$ ) em função do  $T_{max}$  do procedimento de pré-trinca. Uma vez que esse valor de ângulo é alcançado, o processo de pré-trinca é interrompido.

Usando as Eqs. (3.15) a (3.17), o  $\theta_{final}$  é calculado considerando um crescimento de pré-trinca ao longo de todo o passo do entalhe, mas nas extremidades dele há a presença de um efeito de borda. Então, é necessário estudos investigativos para se determinar um fator de correção relacionado à parcela do entalhe que é de fato influenciada pelo efeito de borda. Uma vez determinado esse fator, uma melhor estimativa de  $\theta_{final}$  pode ser realizada.

h) Definir o valor de frequência do ciclo de fadiga, o qual é diretamente relacionado com o nível de torque aplicado. Usualmente, ensaios de pré-trincamento são realizados utilizando frequências de até 15 Hz.

Durante o processo de abertura de pré-trinca, o crescimento da trinca deve ser constantemente monitorado por meio da medição do ângulo de torção do corpo de prova ( $\theta_{CP}$ ). À medida que a trinca cresce, o ângulo de torção do corpo de prova se eleva gradualmente. Quando o valor de  $\theta_{CP}$  é igual a  $\theta_{final}$ , o processo de abertura de pré-trinca é suspenso. Isso indica que o valor de  $a/D$ , definido previamente ao ensaio, foi atingido.

### *ii) Carregamento monotônico*

- a) Aplicar torque monotônico no corpo de prova (Fig. 3.24) utilizando uma taxa de carregamento constante, até a ocorrência da fratura.
- b) Medir os valores do torque e ângulo de torção do corpo de prova no momento da fratura.
- c) Medir o comprimento da pré-trinca após a fratura do corpo de prova.
- d) Determinar  $G$  e, consequentemente, o  $K_{IC}$  do material, usando as Eqs. (3.15) a (3.17).

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Para tanto o mesmo foi dividido em resultados de: caracterização do material, ensaio preliminar, ensaios definitivos nos corpos de prova SNTT, validação da metodologia proposta e comparação dos resultados dos métodos SNTT e convencional.

### 4.1 Resultados da caracterização do material

#### 4.1.1 Análise da composição química

A Tabela 4.1 mostra os valores médios de composição química para o AISI 4340, bem como a incerteza expandida ( $U$ ) associada para um nível de abrangência de 95 %. Nesta tabela, os elementos (Cr, Ni e Mo) estão destacados em vermelho por serem aqueles de maior relevância para as propriedades deste material. O cromo e o molibdênio são responsáveis por melhorar a resposta do aço aos tratamentos térmicos, possibilitando a obtenção de maiores valores de resistência mecânica, à fadiga e ao impacto. O níquel, por sua vez, é responsável por aumentar a dureza e ductilidade do material. De acordo com a Tab. 4.1, concluiu-se que os resultados da análise da composição química do AISI 4340 atenderam às especificações da norma ASTM A322 (ASTM, 2013).

Tabela 4.1 - Resultados da análise da composição química do AISI 4340.

Elemento	Média (% peso)	U (% peso)
C	0,427	0,005
Mn	0,723	0,005
Si	0,330	0,005
P	0,012	0,004
S	0,001	0,004
Cr	0,791	0,004
Ni	1,720	0,209
Mo	0,299	0,005
Al	0,027	0,004
Cu	0,098	0,004
Ti	0,017	0,004
W	0,030	0,008
V	0,006	0,004
Nb	0,007	0,004
B	0,001	0,004

#### 4.1.2 Direção de laminação

A Figura 4.1 mostra a microestrutura do AISI 4340 na condição como recebido. A microestrutura observada nas três faces analisadas foi similar. É possível notar que não há evidências que indiquem a direção de laminação da chapa avaliada. Normalmente, os grãos na direção de laminação são achatados longitudinalmente, além de existir um bandeamento químico pronunciado.

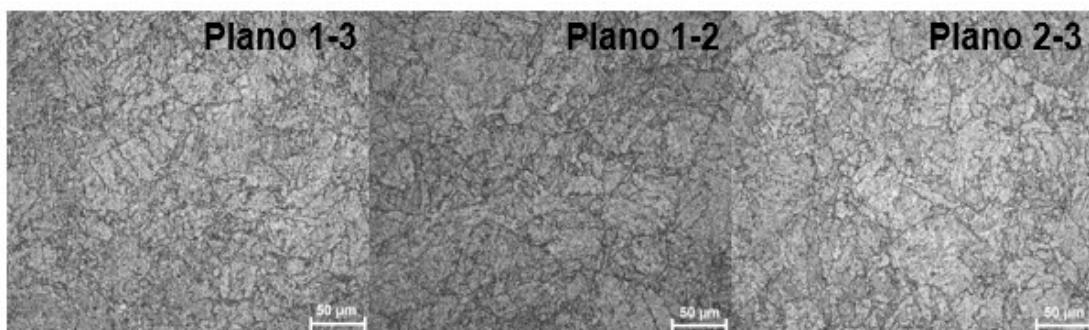


Figura 4.1 - Microestrutura nas 3 faces da amostra do AISI 4340 como recebido.

A Figura 4.2 mostra as imagens obtidas na análise da microestrutura para o AISI 4340 tratado termicamente. Na Figura 4.2a se observa a presença de regiões de coloração branca,

indicando que há um bandeamento químico, porém elas não se encontram alinhadas, não possibilitando definir qual a direção de laminação. Já na Fig. 4.2b, é possível notar que as regiões de coloração branca se alinham na direção 2, o que indica que essa é a direção de laminação da chapa.

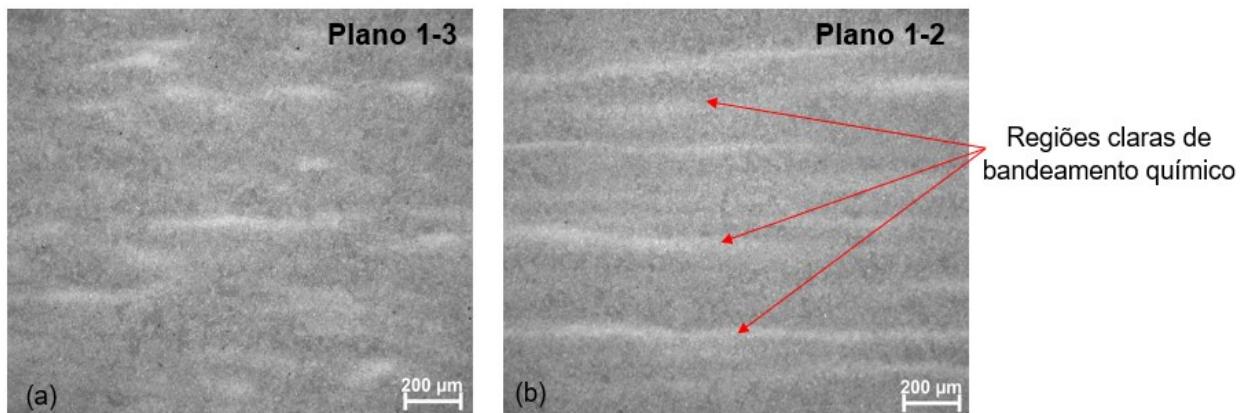


Figura 4.2 - Imagens da microestrutura do material (a) bandeamento químico em uma única direção; (b) claro bandeamento químico na direção 2.

#### 4.1.3 Propriedades mecânicas

A Tabela 4.2 mostra os valores de dureza Rockwell C do AISI 4340, bem como o valor médio e a incerteza expandida com uma probabilidade de abrangência de 95 %. A dureza obtida foi em média de 45,7 HRC com uma incerteza expandida associada de 0,3 HRC.

Tabela 4.2 - Valores de dureza obtidos após o tratamento térmico do AISI 4340 utilizado para fabricação dos corpos de prova dos ensaios de tração.

Medição	Dureza (HRC)
1	46,0
2	45,2
3	45,7
4	45,9
5	45,7
<b>Média</b>	<b>45,7</b>
<b>U</b>	<b>0,3</b>

A Tabela 4.3 mostra os resultados dos ensaios de tração, o valor médio e o respectivo desvio padrão (s) das cinco medições (nível de confiança de 68,27 %).

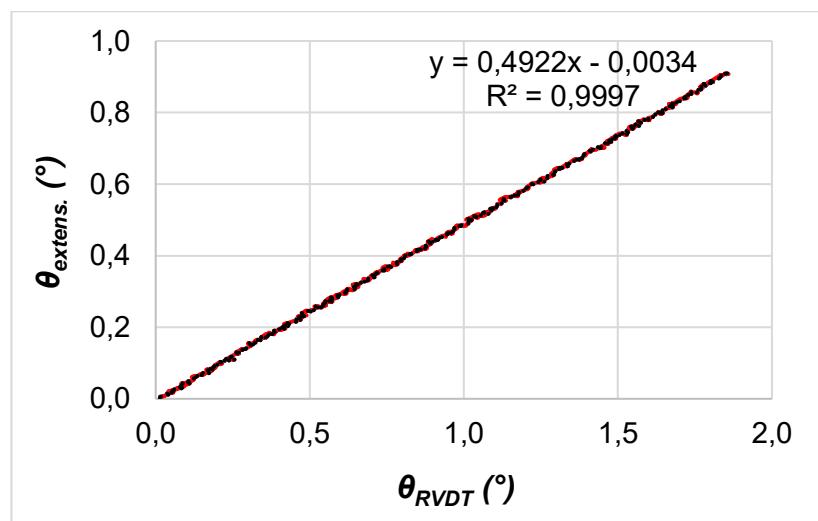
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de tração para o aço AISI 4340 com 45,7 HRC.

Corpo de Prova	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)
1	202,3	1358,9	1515,7
2	204,2	1344,0	1504,1
3	203,5	1347,3	1502,6
4	206,0	1366,3	1519,8
5	203,5	1353,7	1509,8
<b>Média</b>	203,9	1354,0	1510,4
<b>s (68,27 %)</b>	1,3	8,9	7,4

Os valores médios para o limite de escoamento e o limite de resistência do aço AISI 4340 foram consideravelmente maiores quando comparados com aqueles reportados por Villares (1992) de 1275 e 1425 MPa, respectivamente. Isso pode ser justificado pela alta qualidade do material utilizado.

## 4.2 Ensaio preliminar

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram as curvas  $\theta_{RVDT}$  versus  $\theta_{extens.}$  e  $\theta_{extens.}$  versus Torque ( $T$ ) para o corpo de prova do ensaio preliminar. Observa-se que o comportamento das curvas em ambos os casos é linear. O coeficiente de correlação  $R^2$  é de 0,9997 e 0,9990, respectivamente. A não-linearidade observada foi de  $0,0127^\circ$  e  $0,0058^\circ$  para as curvas  $\theta_{RVDT}$  versus  $\theta_{extens.}$  e  $\theta_{extens.}$  versus Torque ( $T$ ), respectivamente.

Figura 4.3 - Curva  $\theta_{RVDT}$  versus  $\theta_{extens.}$  obtida no ensaio preliminar.

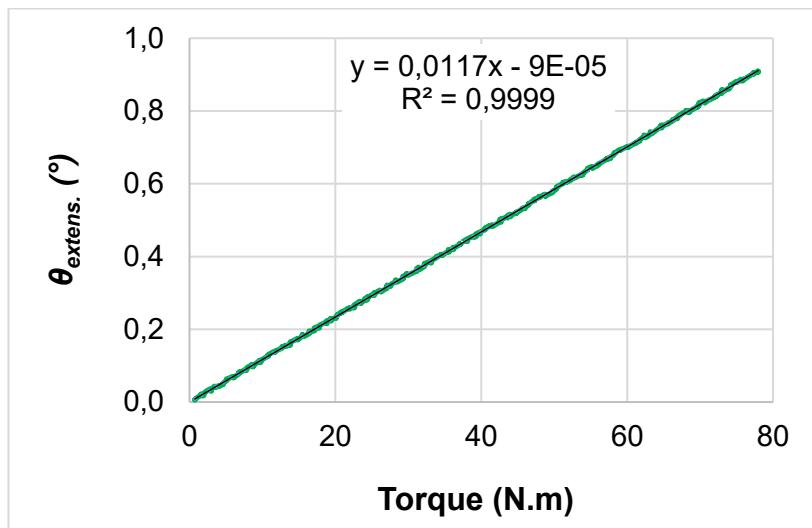


Figura 4.4 - Curva  $\theta_{\text{extens.}}$  versus  $T$  obtida no ensaio preliminar.

### 4.3 Ensaios definitivos nos corpos de prova SNTT

A Tabela 4.4 mostra os valores médios de dureza das três amostras dos corpos de prova SNTT, bem como a incerteza expandida associada para uma probabilidade de abrangência de 95 %. A dureza exibe valores médios entre 45,1 e 45,7 HRC com incerteza de 1,2 HRC no pior caso, amostra 3. Esta incerteza expandida representou 2,6 % da dureza média e pode ser considerada adequada.

Tabela 4.4 - Valores médios de dureza para as três amostras avaliadas. Incerteza expandida associada para uma probabilidade de 95 %.

Amostra	Valor médio (HRC)	Incerteza expandida (HRC)
1	45,1	0,8
2	45,7	0,2
3	45,7	1,2

#### 4.3.1 Resultados dos ensaios SNTT

A Figura 4.5 mostra um corpo de prova SNTT após a fratura. É possível observar que a fratura ocorre ao longo de todo o entalhe do corpo de prova. A Figura 4.6 mostra as curvas de torque versus  $\theta_{CP}$  obtidas

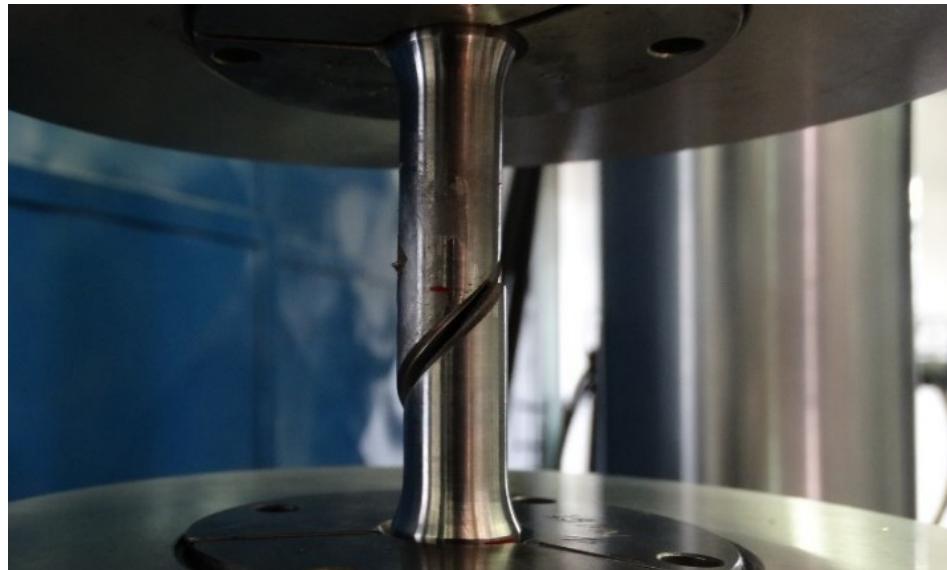


Figura 4.5 - Corpo de prova SNTT fraturado após o carregamento monotônico.

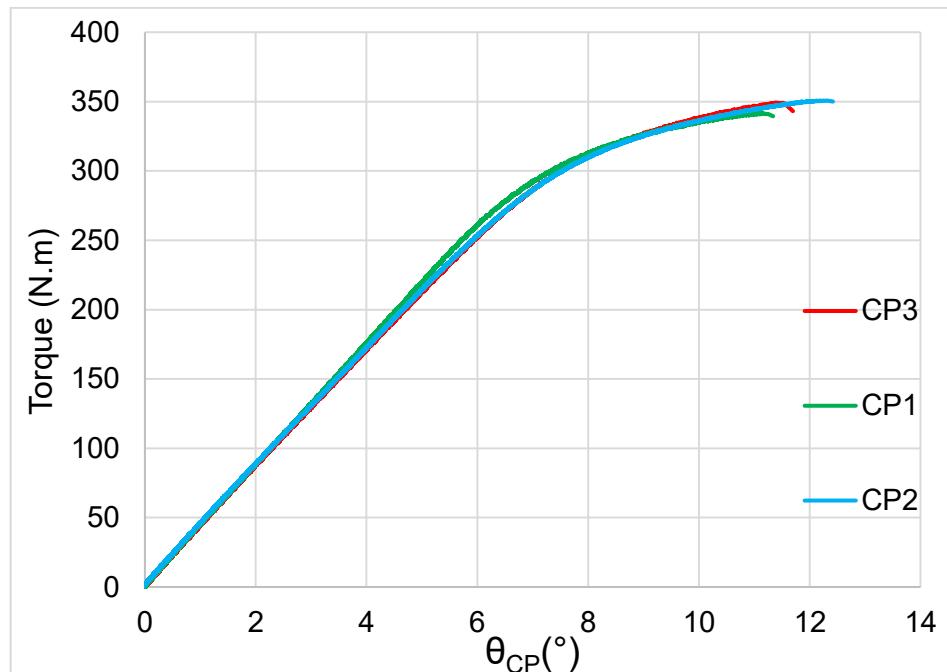


Figura 4.6 - Curvas Torque *versus*  $\theta_{CP}$  para os corpos de prova SNTT (CPs).

A Figura 4.6 mostra três curvas muito próximas, apresentando comportamento similar nos estados elástico e plástico, bem como valores de torque similares. Este fato é indicativo da excelente repetibilidade dos resultados obtidos. O torque e o ângulo no momento da fratura calculados a partir destas curvas são mostrados na Tab. 4.5. A repetibilidade do torque de fratura dos três corpos de prova foi de 4,6 N.m para um nível de confiança de 95 %. Este valor representa, em relação ao maior torque medido, aproximadamente 1,3 %. De forma análoga,

o ângulo de torção do corpo de prova também apresentou boa repetibilidade, aproximadamente  $0,27^\circ$ , representando 4,5 % em relação ao maior valor de ângulo de torção.

Tabela 4.5 - Valores de torque e de  $\theta_{CP}$  no momento da fratura para os três corpos de prova SNTT.

Corpo de prova	Torque de fratura (N.m)	$\theta_{CP}$ ( $^\circ$ )
1	342,3	5,568
2	350,8	6,088
3	349,4	5,692

A Tabela 4.6 mostra os valores médios do comprimento de pré-trinca dos corpos de prova SNTT e a incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95 %. Ainda, é mostrada a relação  $a/D$  obtida ao final da abertura da pré-trinca. É importante ressaltar que o parâmetro  $a$  é definido como a soma do comprimento da pré-trinca e a profundidade do entalhe.

Tabela 4.6 - Valores médios do comprimento de pré-trinca para os três corpos de prova SNTT.

Corpo de prova	Valor médio (mm)	U (mm)	$a/D$
1	1,119	0,033	0,148
2	0,932	0,048	0,135
3	0,964	0,063	0,140

Na Tabela 4.6 se observa que o comprimento de pré-trinca obtido para os três corpos de prova avaliados é significativamente maior que aquele definido no projeto (0,67 mm). Desta forma, apesar dos esforços realizados no controle da abertura da pré-trinca, a relação  $a/D$  resultou maior que o esperado (0,116). A maior diferença observada foi de 0,032 para o corpo de prova 1, representando um erro relativo de 27,6 %. Pode-se concluir que o método de cálculo do ângulo de torção adotado para definir o critério de parada não se mostrou eficaz e deve ser revisto. Com relação à incerteza expandida associada ao comprimento de pré-trinca observa-se que para o pior caso (corpo de prova 1), esta representa 6,5 % do valor médio.

A Tabela 4.7 mostra os valores de  $K_{IC}$  para cada um dos corpos de prova. Adicionalmente, é apresentada a incerteza expandida associada para uma probabilidade de abrangência de 95 %.

Tabela 4.7 - Valores de  $K_{IC}$  e de incerteza expandida obtidos para os corpos de prova SNTT.

Corpo de prova	Valor de $K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	U (MPa $\sqrt{m}$ )
1	101,5	1,5
2	103,8	1,6
3	101,4	1,6

Na Tabela 4.7 se observa que os valores de  $K_{IC}$  são similares. O valor médio obtido foi 102,2 MPa $\sqrt{m}$  e a incerteza expandida igual a 1,8 MPa $\sqrt{m}$ , para uma probabilidade de abrangência de 95 %. O valor da incerteza representa 1,8 % em relação ao valor médio dos três corpos de prova, indicando a excelente repetibilidade dos resultados. Observou-se que os valores de incerteza expandida foram significativamente baixos.

#### 4.3.2 Análise da superfície de fratura dos corpos de prova SNTT

A Figura 4.7 mostra uma composição de imagens da pré-trinca observada na superfície de fratura em um corpo de prova SNTT de AISI 4340.

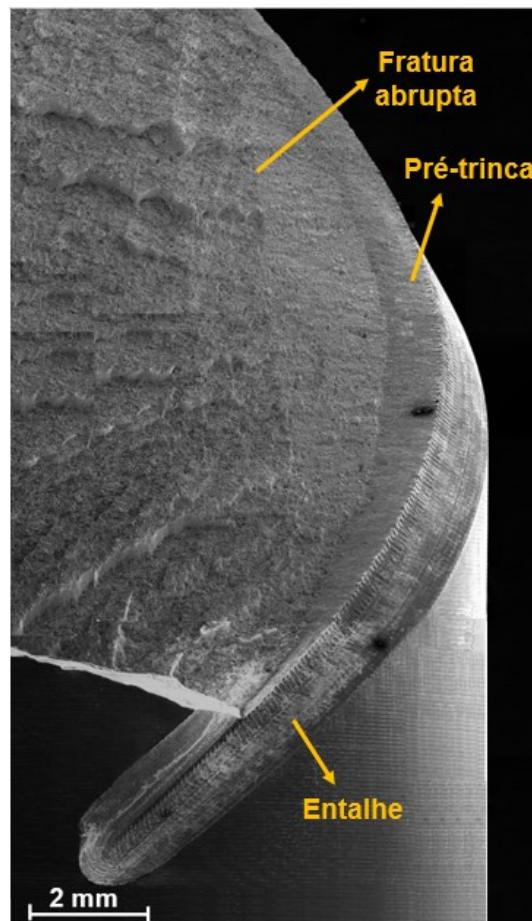


Figura 4.7 - Composição de imagens da superfície de fratura de um corpo de prova SNTT.

A superfície de fratura na imagem da Fig. 4.7 não representa de forma adequada o comprimento da pré-trinca devido ao efeito óptico proporcionado pela inclinação do entalhe e da superfície analisada. O comprimento da fratura se mostrou de forma bastante regular na região central com tendência a diminuir nas extremidades, como mostra a Fig. 4.8.

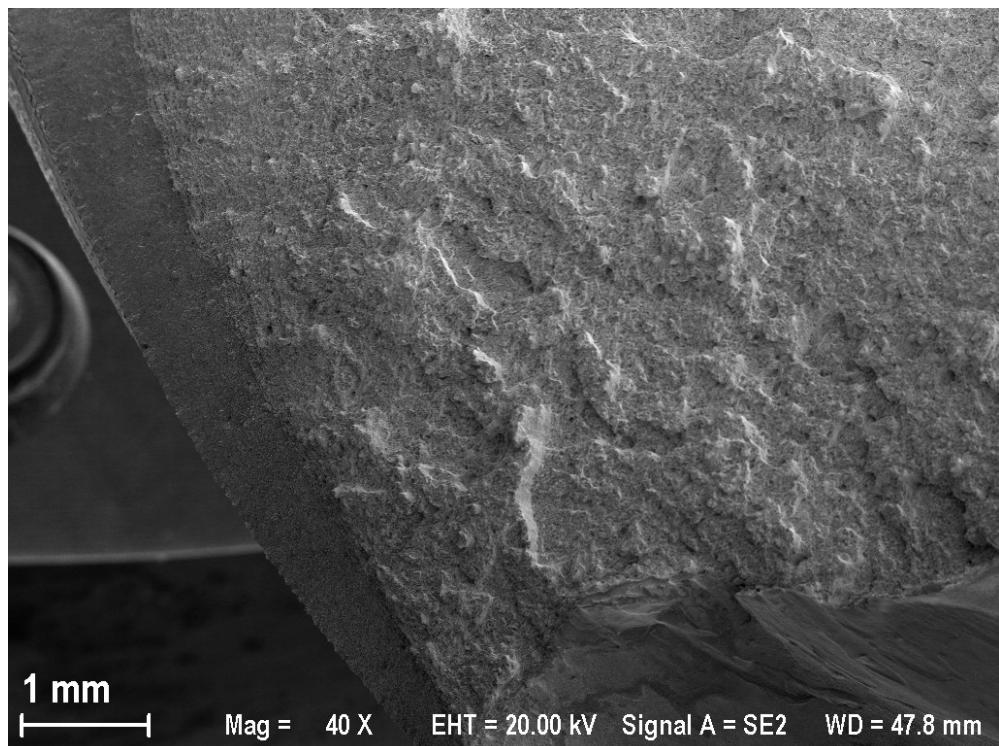


Figura 4.8 - Imagem da pré-trinca em um ângulo diferente.

A Figura 4.9 mostra uma imagem obtida na extremidade do entalhe. Observa-se que a pré-trinca se nucleou e propagou até uma região próxima da extremidade do entalhe, não o percorrendo por completo. Isso comprova que nessas regiões houve um efeito de borda sobre o crescimento de trinca, dificultando a nucleação desta. A Figura 4.10 mostra uma imagem obtida na região demarcada por um retângulo verde na Fig. 4.9, indicando o final da pré-trinca ao longo do entalhe. Observa-se que a usinagem do entalhe por fresa produz um acabamento superficial não muito adequado, ainda que não tenha interferido nos resultados.

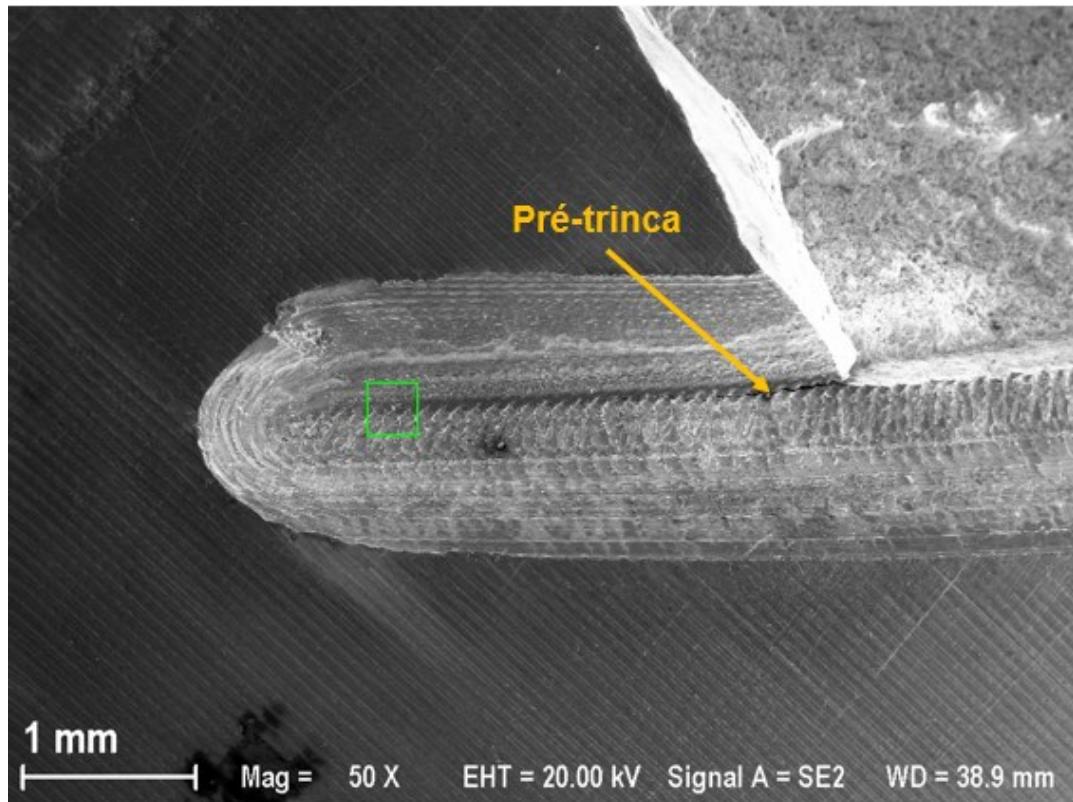


Figura 4.9 - Imagem do crescimento da pré-trinca além da superfície de fratura, acompanhando o entalhe do corpo de prova SNTT.

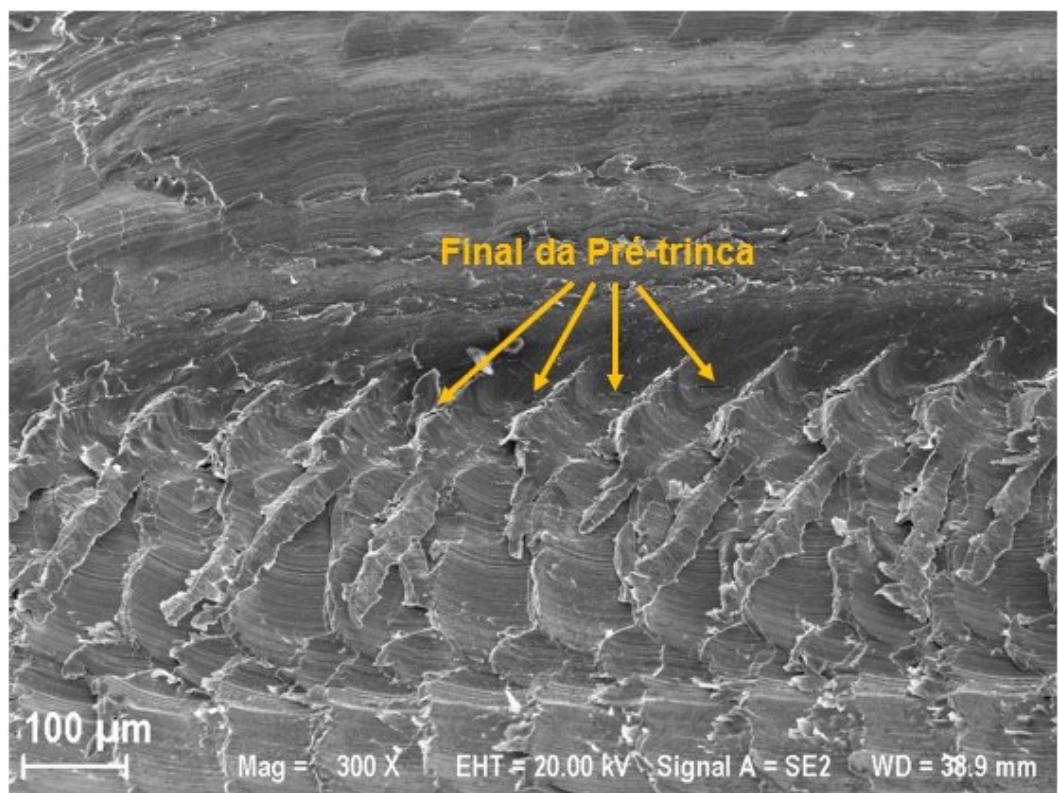


Figura 4.10 - Ampliação da região na qual há o final da pré-trinca ao longo do entalhe.

Na Figura 4.11, em ampliação maior, é possível observar uma imagem da transição entre as regiões de pré-trinca por fadiga e de fratura monotônica, mostrando a diferença de morfologia. Com foco apenas na região da pré-trinca, a Fig. 4.12 não evidencia a presença de estrias de fadiga, mecanismo comum na propagação de uma trinca por fadiga.

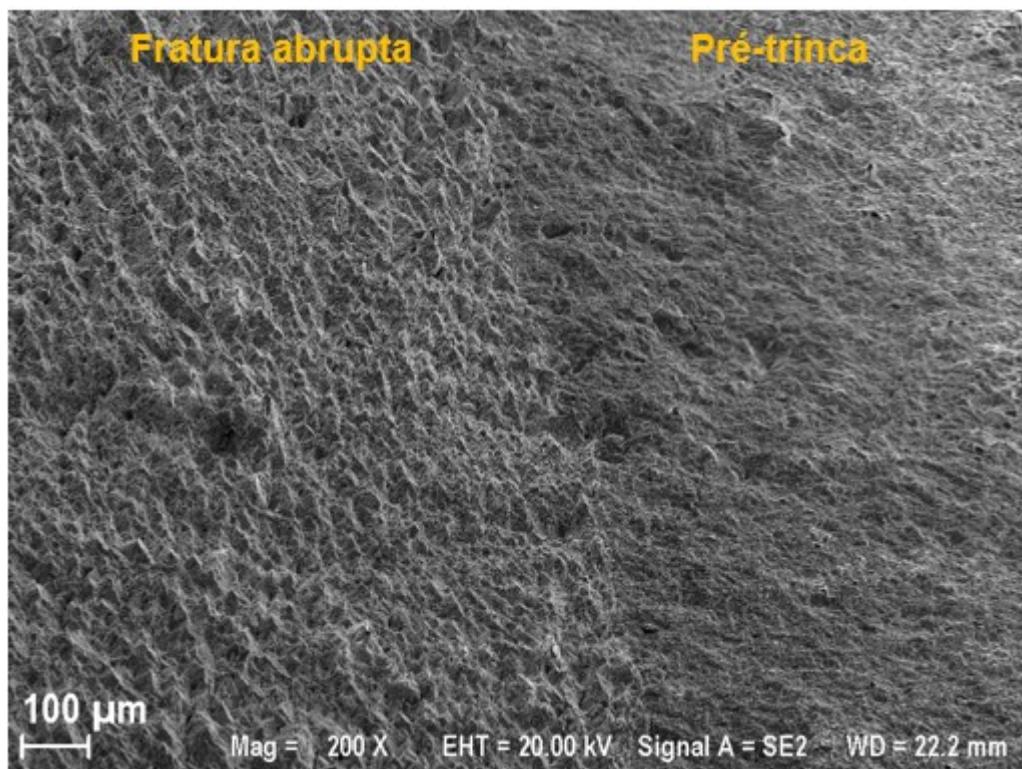


Figura 4.11 - Transição entre as regiões de pré-trinca e fratura abrupta de um corpo de prova SNTT de AISI 4340 ensaiado.

Na região de fratura monotônica, foi possível notar claramente a presença de microvazios (*dimples*) profundos, como mostra a Fig. 4.13. A presença destes mecanismos evidencia que a fratura se deu em carregamentos trativos, ou seja, dominância do modo I e com pouca deformação plástica. A Figura 4.14 mostra a presença de microvazios com formatos diferentes por se tratar de uma área mais afastada da região de transição pré-trinca/fratura abrupta. Estes se apresentam de formato alongado e são menos profundos, indicando que ocorreram em domínio de carregamentos cisalhantes. Concluiu-se então, que nessa região, além do modo I, o modo III foi presente.

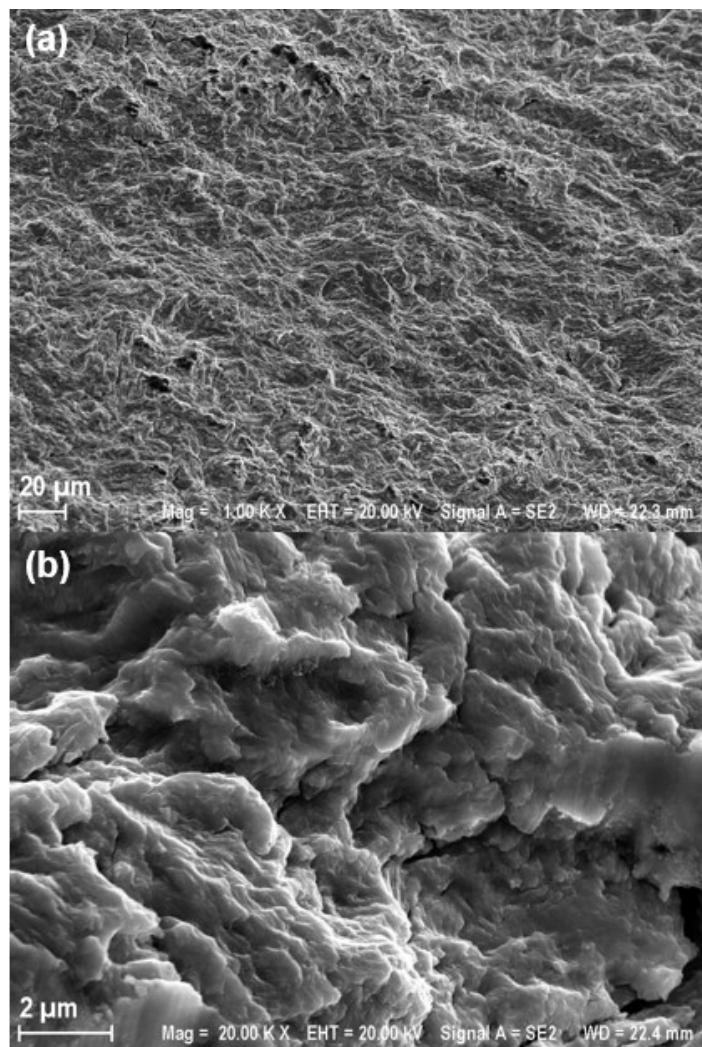


Figura 4.12 - Região de pré-trinca de um corpo de prova SNTT.

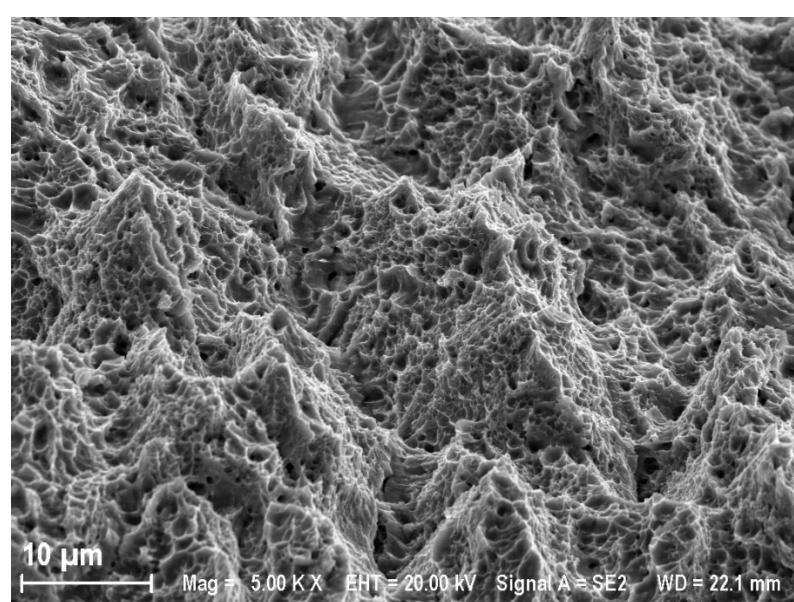


Figura 4.13 - Região da fratura abrupta de um corpo de prova SNTT próxima à transição pré-trinca/fratura abrupta, indicando claramente a presença de *dimples*.

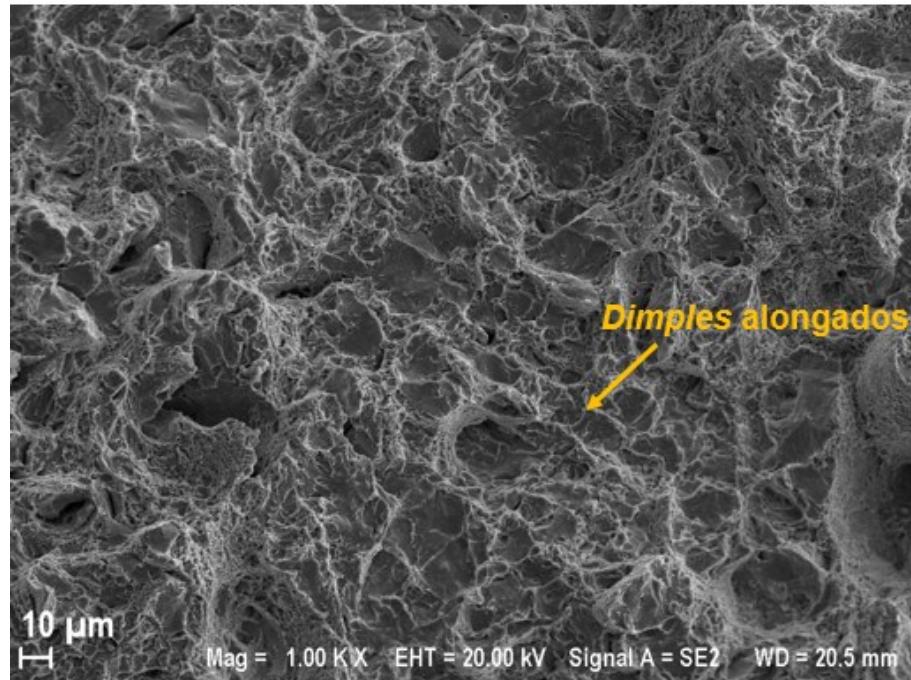


Figura 4.14 - Região da fratura abrupta de um corpo de prova SNTT.

A sequência de imagens mostradas nas Figs. 4.15 e 4.16 indica que houve crescimento da trinca ao longo de todo o entalhe. Entretanto, na extremidade, a trinca observada é consideravelmente menor (cerca de 6 a 7 vezes quando comparada às outras duas seções analisadas). Isso ocorre, pois, essa região é altamente influenciada pela parte do corpo de prova que não possui entalhe, o que dificulta a nucleação e propagação da trinca. Conclui-se então que o fato de o crescimento da pré-trinca ter ultrapassado o valor desejado, pode ter ocorrido em função desse efeito de borda. Os ângulos de torção definidos como critério de parada foram calculados considerando um crescimento completo da pré-trinca ao longo do entalhe. Como isso não aconteceu, para atingir o mesmo ângulo de torção de parada, a trinca se propagou mais do que o desejado em parte da helicoide.

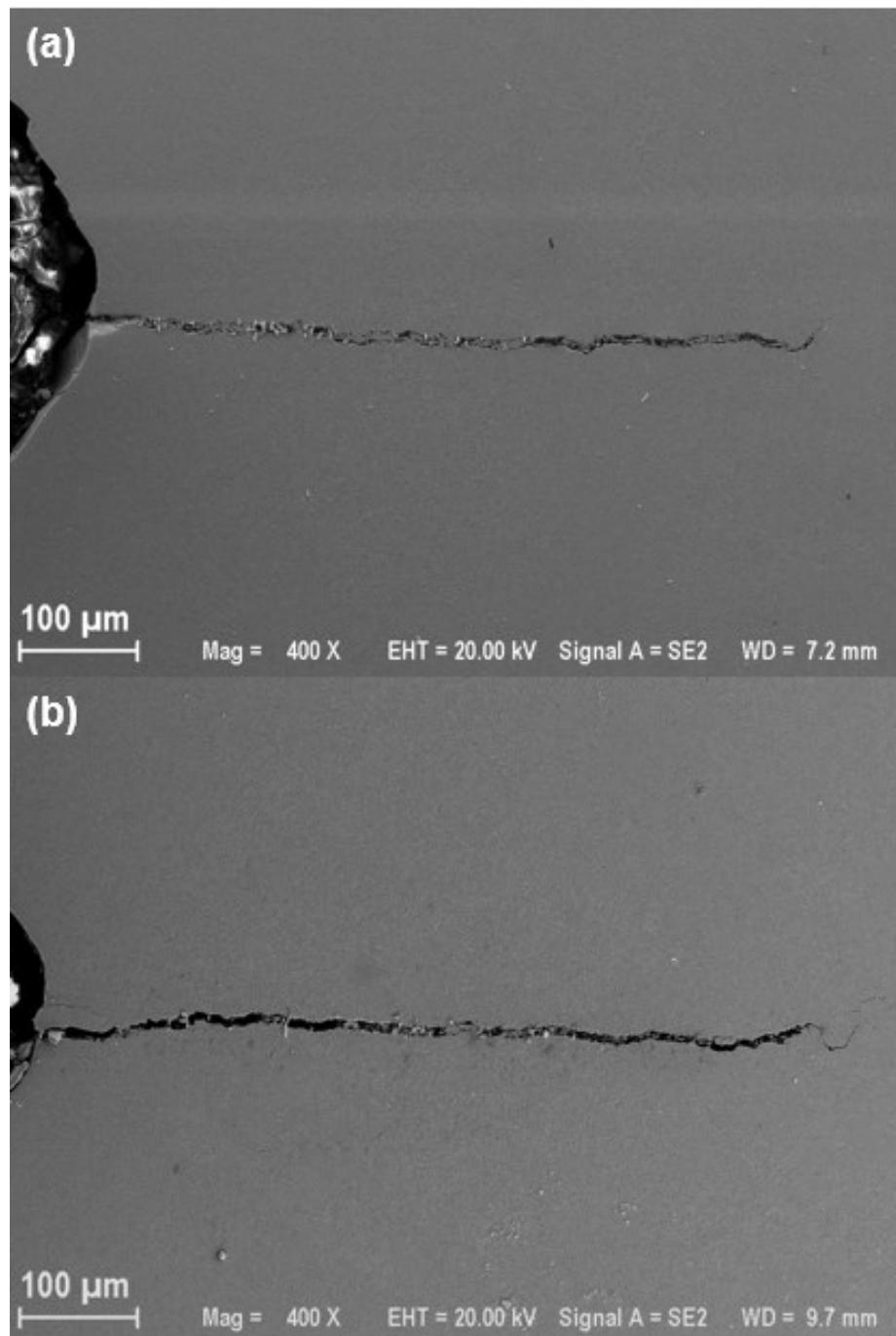


Figura 4.15 - Imagens da pré-trinca em duas seções de corte a 45° além da região de fratura de um corpo de prova SNTT.

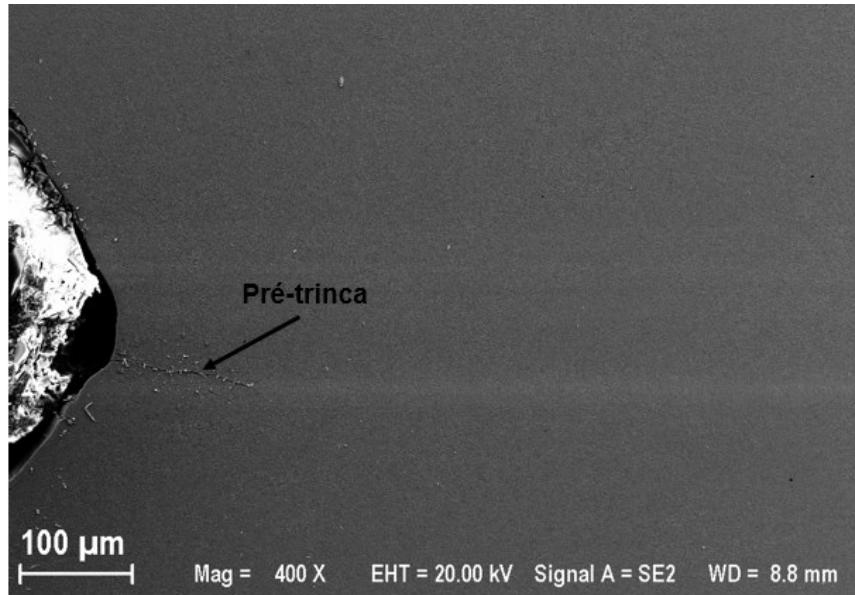


Figura 4.16 - Imagem da pré-trinca em uma seção de corte a 45° próxima à extremidade do entalhe de um corpo de prova SNTT.

A Figura 4.17 mostra a frente da trinca em uma das seções cortadas a 45°, onde observam-se trincas que parecem tender a propagação ao longo dos antigos contornos dos antigos grãos austeníticos. Entretanto, a observação em MEV não mostrou a presença de fratura intergranular e sim por coalescência de microvazios. É importante ressaltar que a realização desse corte a 45° não é uma tarefa trivial. Sabendo disso, não foram realizadas medições nessas seções, pois o resultado destas poderiam mostrar valores que não condiziam com o comprimento real das trincas.

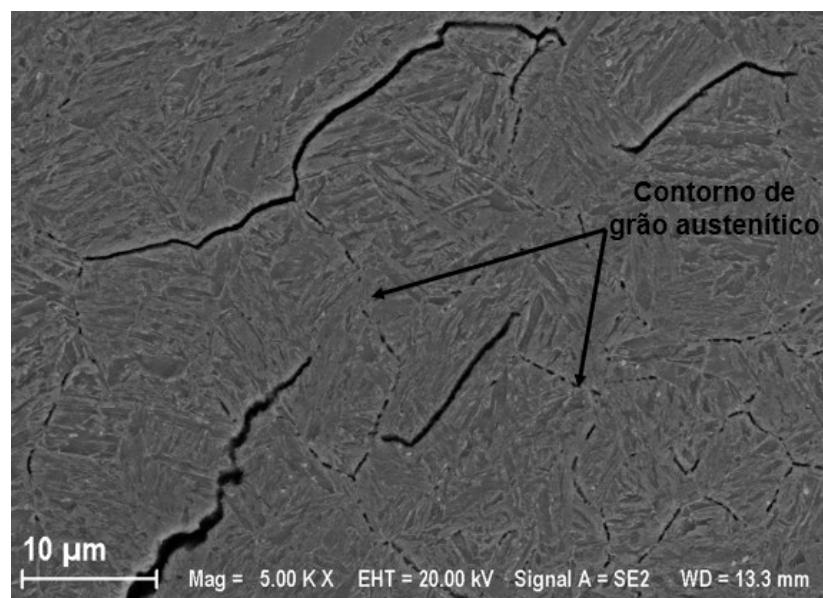


Figura 4.17 - Imagem da trinca por fase propagando ao longo dos contornos dos antigos grãos austeníticos.

#### 4.3.3 Resultados das medições com os extensômetros eletromecânicos e eletro-resistivos

A Figura 4.18 compara os valores do ângulo de torção indicados pelo extensômetro eletromecânico durante o ensaio preliminar com os valores do ângulo de torção calculados (segundo equação indicada na Fig. 4.3) para o extensômetro eletromecânico durante o ensaio definitivo. É possível notar que a maior diferença observada ocorre para o maior torque aplicado (cerca de 78 N.m) e é de 0,065°. Essa diferença representa cerca de 7,1 % em termos do ângulo de torção indicado pelo extensômetro eletromecânico no ensaio preliminar. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que, apesar do comprimento da pré-trinca se encontrar maior no ensaio definitivo, o crescimento da mesma não se deu ao longo de todo o entalhe. Em contrapartida, no corpo de prova do ensaio preliminar o entalhe foi usinado nas dimensões finais desejadas ao final da abertura da pré-trinca, com um entalhe de passo igual a 33,33 mm. Dessa forma, o corpo de prova do ensaio preliminar foi menos resistente aos torques aplicados, rotacionando mais.

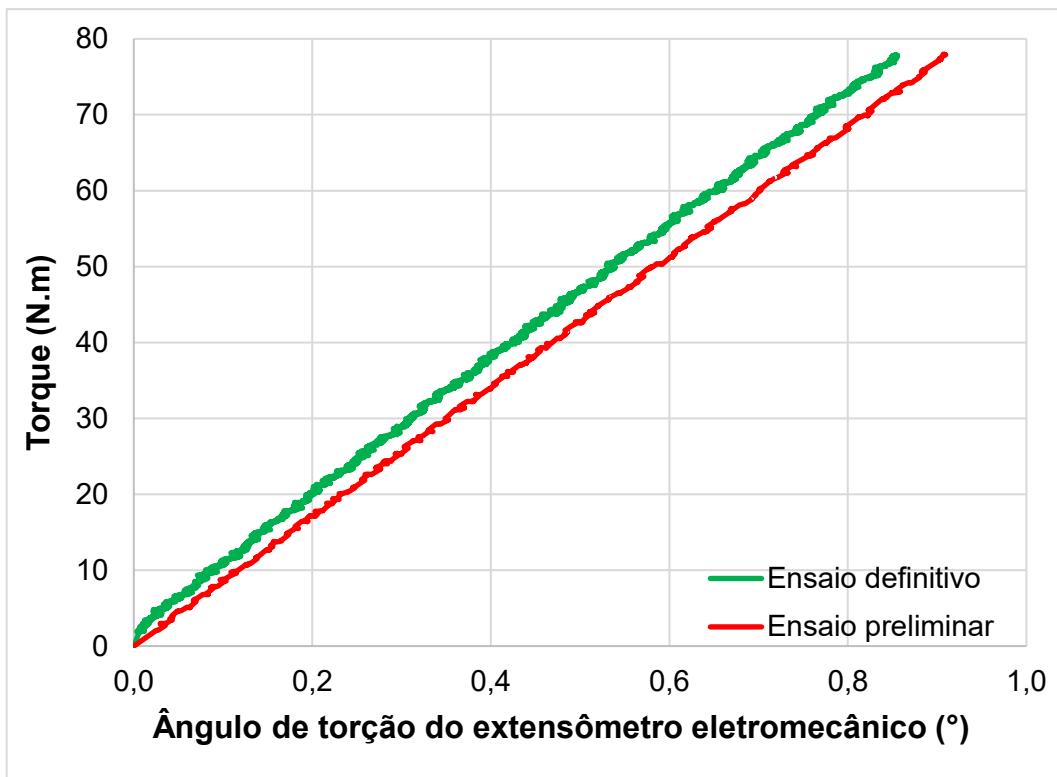


Figura 4.18 - Curvas Torque versus Ângulo de torção do extensômetro eletromecânico para os corpos de prova do ensaio definitivo e preliminar.

Na Figura 4.19 é possível notar um comportamento similar para os ângulos de torção calculados por meio das medições de deformação dos extensômetros eletro-resistivos. A

maior diferença observada é de  $0,172^\circ$ , representando cerca de 17,3 % do valor do ângulo de torção do ensaio preliminar.

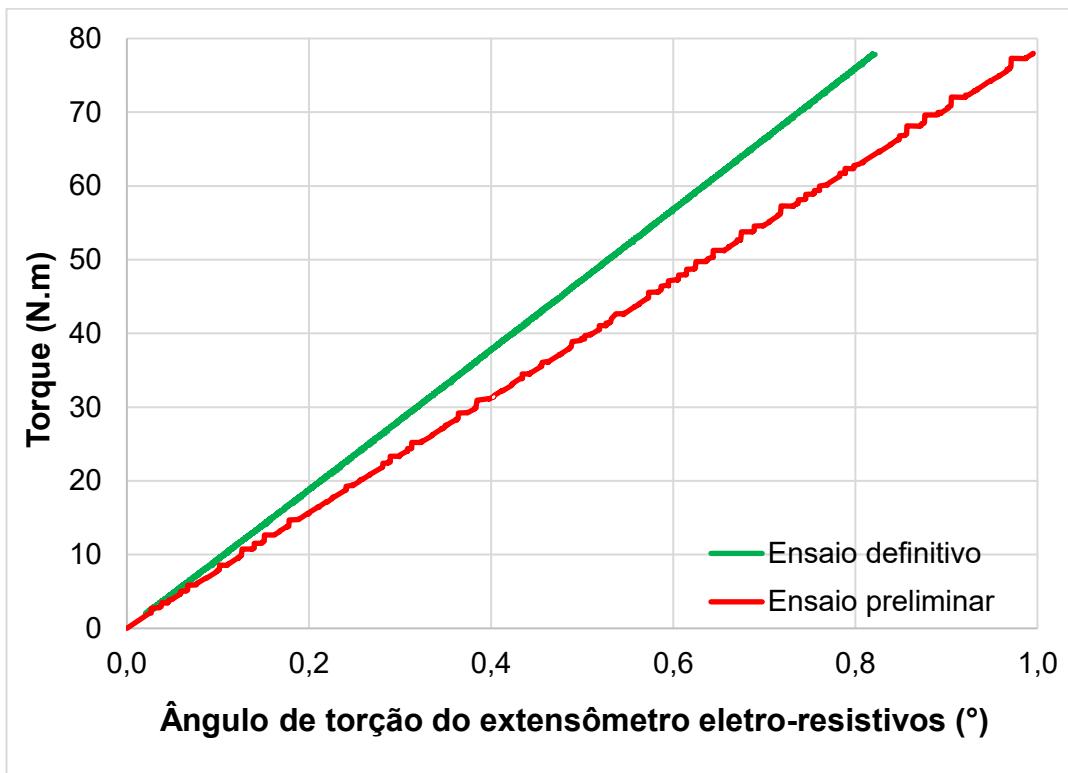


Figura 4.19 - Curvas Torque versus Ângulo de torção dos extensômetros para os corpos de prova do ensaio definitivo e preliminar.

As Figuras 4.20 e 4.21 compararam os valores de ângulo de torção medidos por ambos instrumentos, nos ensaios preliminar e definitivo, respectivamente. É possível notar que durante o ensaio preliminar o extensômetro eletromecânico tende a indicar um valor de ângulo menor que o ângulo de torção calculado pela deformação do eletro-resistivo. A diferença entre eles se eleva proporcionalmente ao torque aplicado, sendo que a maior diferença observada é de  $0,085^\circ$ , cerca de 9,4 % em relação ao ângulo de torção indicado pelo extensômetro MTS. Já no ensaio definitivo, as curvas Torque versus Ângulo de torção dos dois instrumentos se alternam, apresentando uma diferença máxima de  $0,045^\circ$ , aproximadamente 5,2 % em relação ao ângulo de torção calculado para o extensômetro eletromecânico.

Pode-se concluir então que as dimensões do entalhe do corpo de prova preliminar inferem em campos de tensão/deformação que resultam em maiores deformações medidas pelo extensômetro eletro-resistivo. O extensômetro eletromecânico por sua vez não apresenta sensibilidade significativa em relação à geometria do entalhe. Por outro lado, no corpo de prova definitivo, não há influência do entalhe nos valores medidos.

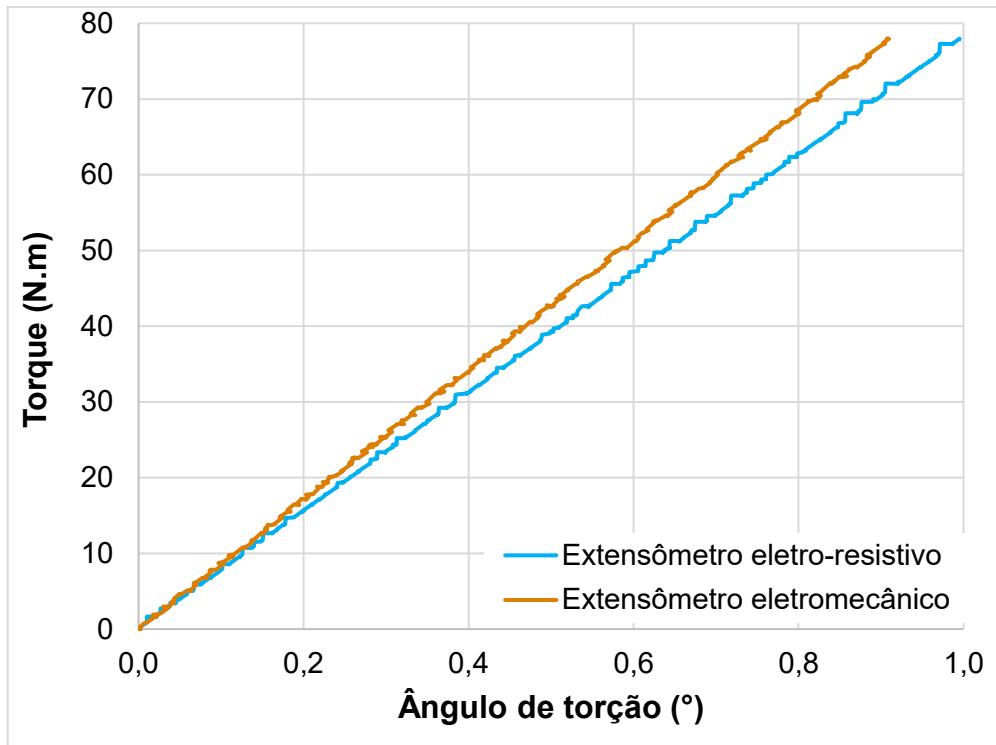


Figura 4.20 - Curvas Torque versus Ângulo de torção do extensômetro eletromecânico e do extensômetro eletro-resistivo para o corpo de prova do ensaio preliminar.

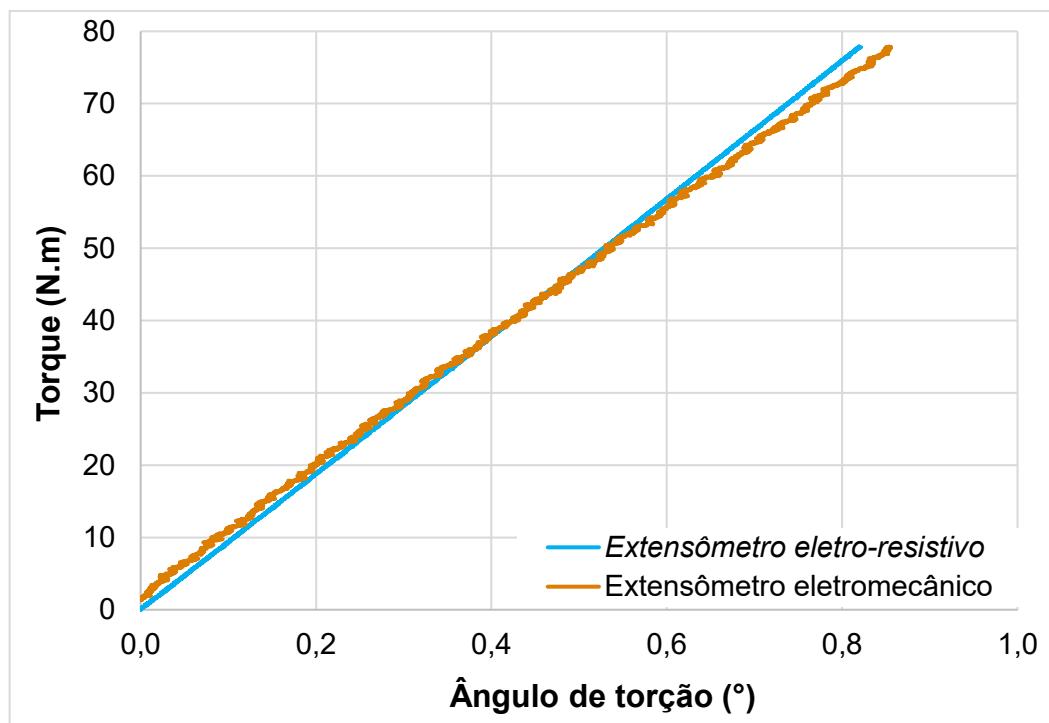


Figura 4.21 - Curvas Torque versus Ângulo de torção do extensômetro eletromecânico e do extensômetro eletro-resistivo para o corpo de prova do ensaio definitivo.

Em resumo, os resultados das medições do ensaio preliminar foram utilizados para definição de importantes parâmetros dos ensaios definitivos, quais sejam: o critério de parada da abertura de pré-trinca e o fator de correlação para cálculo do ângulo de torção do corpo de prova ao final da fratura. Porém, agora foi possível concluir que, previamente à definição desses parâmetros, deve ser realizada uma correção nos resultados. Essa correção se dá em função do crescimento da trinca não ocorrer ao longo de todo o entalhe e, também, dos valores medidos durante o ensaio preliminar serem significativamente influenciados pelas dimensões do entalhe do corpo de prova.

#### 4.4 Validação da metodologia proposta

A Figura 4.22 mostra o crescimento uniforme da pré-trinca nos três corpos de prova C(T). A Tabela 4.8 mostra os valores médios do comprimento de pré-trinca para as regiões de medição do corpo de prova C(T). Além disso, é apresentada também a incerteza expandida associada a cada uma das medições para uma probabilidade de abrangência de 95 %. Adicionalmente, foi determinada a média final e a incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95 % calculados considerando os valores da pré-trinca para as regiões 25, 50 e 75 %. Foi possível notar que os maiores valores das pré-trinca foram medidos na região próxima à metade da espessura do corpo de prova. As maiores relações entre a incerteza expandida e o valor médio dos comprimentos de pré-trinca nas cinco regiões analisadas foram 2 %, 1,6 % e 1% para os corpos de prova 1, 2 e 3, respectivamente.

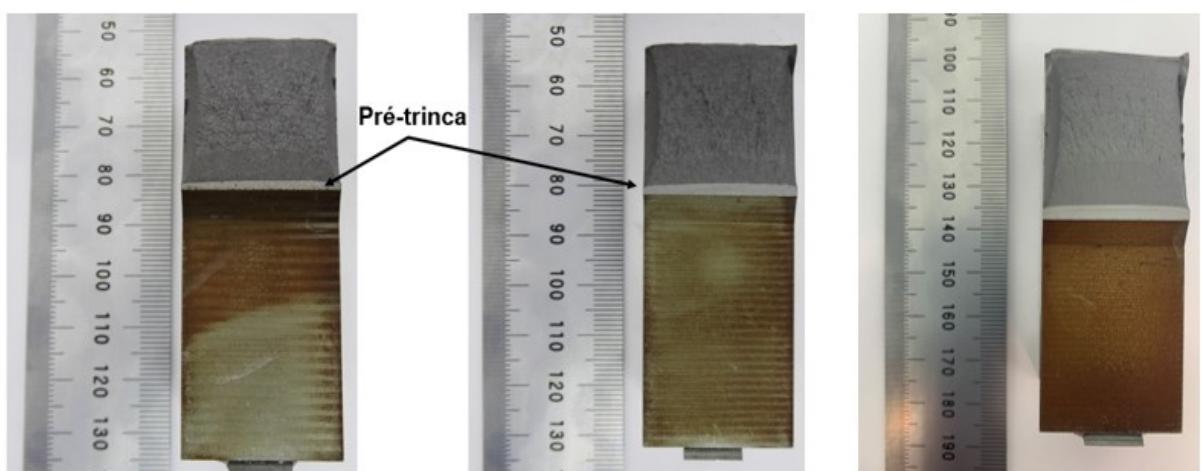


Figura 4.22 - Crescimento da pré-trinca nos corpos de prova C(T).

Tabela 4.8 - Medições dos comprimentos de pré-trinca dos corpos de prova C(T) ensaiados.

Região	CP1		CP2		CP3	
	Média	U	Média	U	Média	U
Extremidade 1 (mm)	0,914	0,018	1,105	0,016	1,837	0,014
Extremidade 2 (mm)	1,028	0,018	1,238	0,014	1,917	0,016
25 % da espessura (mm)	1,310	0,014	1,439	0,013	2,564	0,016
50 % da espessura (mm)	1,474	0,018	1,623	0,016	2,466	0,018
75 % da espessura (mm)	1,467	0,014	1,450	0,024	2,456	0,024
<b>Média final (mm)</b>	1,417		1,504		2,495	
<b>U (mm)</b>	0,004		0,005		0,006	

A Tabela 4.9 mostra os comprimentos totais da trinca (comprimentos de pré-trinca somados ao comprimento do entalhe) para cada um dos corpos de prova, o valor médio final, considerando as três regiões intermediárias (25, 50 e 75 %) e a respectiva incerteza expandida (probabilidade de abrangência de 95 %). Foi possível verificar que a diferença relativa entre os comprimentos totais nas extremidades para os CP1, CP2 e CP3 foram, respectivamente, 0,4 %, 1,1 % e 0,3 %. Além disso, a maior diferença relativa entre o valor médio final e os valores medidos nas extremidades foi de 1,8 %, 1,4 % e 2,6 %, para os corpos de prova 1, 2 e 3. A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) determina que essas diferenças relativas não devem ultrapassar 10 %.

Tabela 4.9 - Comprimentos totais trinca dos corpos de prova C(T) ensaiados.

Região	CP1	CP2	CP3
Extremidade 1 (mm)	26,818	27,441	25,068
Extremidade 2 (mm)	26,932	27,574	25,148
25 % da espessura (mm)	27,214	27,770	25,795
50 % da espessura (mm)	27,378	27,950	25,697
75 % da espessura (mm)	27,370	27,795	25,687
<b>Média final (mm)</b>	27,321	27,840	25,726
<b>U (mm)</b>	0,011	0,013	0,010

Ainda, os valores da média final do comprimento total da trinca representam aproximadamente 0,54, 0,55 e 0,50 da largura do corpo de prova,  $W$ , para os corpos de prova 1, 2 e 3, respectivamente. A norma ASTM E399 (ASTM, 2019) recomenda que esses valores se estejam entre 0,45 e 0,55.

A Tabela 4.10 mostra os resultados para  $K_q$ ,  $P_q$ ,  $P_{MAX}/P_q$  e  $B$  dos corpos de prova C(T). É possível notar que os valores da relação  $P_{MAX}/P_q$  foram válidos, tendo em vista que eles deveriam ser menores que 1,10. Além disso, os valores de  $B$  para os três corpos de prova foram 14,749 e 12,178 mm. Ao se comparar esses valores com os valores de  $B$  calculados por meio dos valores de  $K_{IC}$  obtidos pelo ensaio, foi possível concluir que o ensaio foi válido quanto as dimensões do corpo de prova, já que  $B$  de projeto é maior que o  $B$  calculado.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios nos corpos de prova C(T).

	$K_q$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$P_q$ (kN)	$P_{max}/P_q$	$B$ (mm)
CP1	104,3	52,278	1,030	14,749
CP2	94,5	49,128	1,029	12,178
CP3	102,7	60,304	1,017	14,383

O valor médio dos resultados foi de 100,5 MPa $\sqrt{m}$  e a incerteza padrão do tipo A igual a 2,4 MPa $\sqrt{m}$  para uma probabilidade de abrangência de 95 %.

#### 4.5 Comparação dos resultados dos métodos SNTT e convencional

A Figura 4.23 os valores de  $K_{IC}$  para o aço AISI 4340 em função dos métodos avaliados. A barra de erros indica o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 %. É possível observar que o valor médio de  $K_{IC}$  para o aço AISI 4340 obtido pelo método convencional é menor que aquele resultante do teste SNTT. Ainda, os valores de  $K_{IC}$  obtidos pelo método SNTT apresentaram boa exatidão com um erro sistemático de 1,7 % em relação ao método convencional. Sabendo que a incerteza apresenta valor consideravelmente baixo em comparação à média, o erro máximo do método SNTT em relação ao método convencional é igual ao erro sistemático.

O desvio padrão associado aos valores de  $K_{IC}$  obtidos pelo método convencional é relativamente maior que aquele associado aos resultados do teste SNTT. O desvio padrão representa 5,3 % do valor médio de  $K_{IC}$  para o método convencional e 1,4 % para o SNTT. Pelo exposto pode-se concluir que há uma maior repetibilidade associada aos valores de  $K_{IC}$  fornecidos pelo método SNTT.

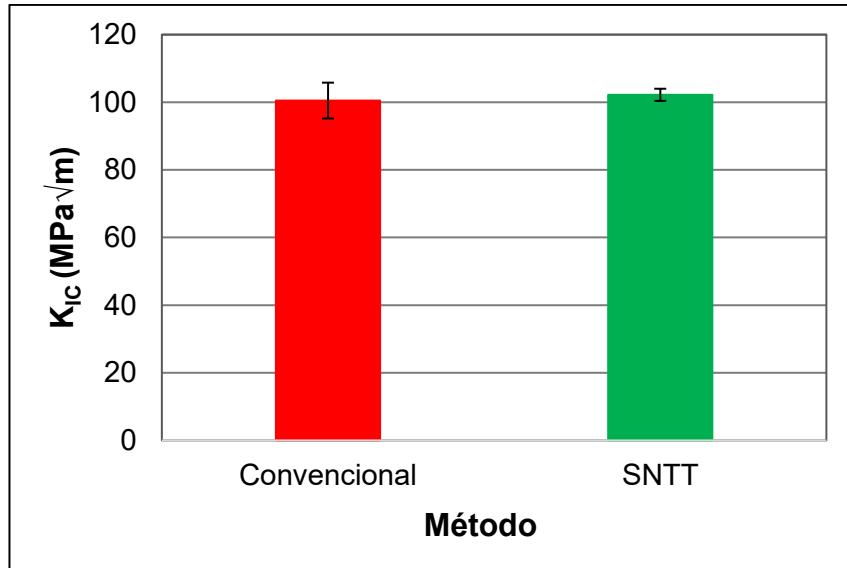


Figura 4.23 - Valor médio de  $K_{Ic}$  para o aço AISI 4340 em função do método, com barra de erros indicando o desvio padrão para um nível de confiança de 68,27 %.

Ainda, foi possível verificar que a incerteza associada à determinação de  $K_{Ic}$  utilizando o método SNTT foi 27,8 % menor, quando comparada com a incerteza obtida na utilização do método convencional. A incerteza representa cerca de 2,3 % e 1,8 % para os métodos convencional e SNTT, respectivamente. Dessa forma, conclui-se que o método SNTT apresentou resultados mais confiáveis.

O *box plot* referente aos valores de  $K_{Ic}$  em função dos métodos avaliados, Fig. 4.24, mostra que os valores de tenacidade à fratura fornecidos por ambos os métodos são similares. Estes resultado é conformado por meio da ANOVA, Tab. 4.11.

A partir da Tab. 4.11 conclui-se que, para uma confiabilidade estatística de 95 %, o fator método não provocou efeitos estatisticamente significativos nos valores de  $K_{Ic}$ . A normalidade dos resíduos foi verificada por meio da distribuição dos resíduos em função dos valores observados de  $K_{Ic}$  e da distribuição dos resíduos em função dos valores preditos de  $K_{Ic}$ . Os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero em função dos valores observados de  $K_{Ic}$  (Fig. 4.25), bem como em função dos valores preditos (Fig. 4.26).

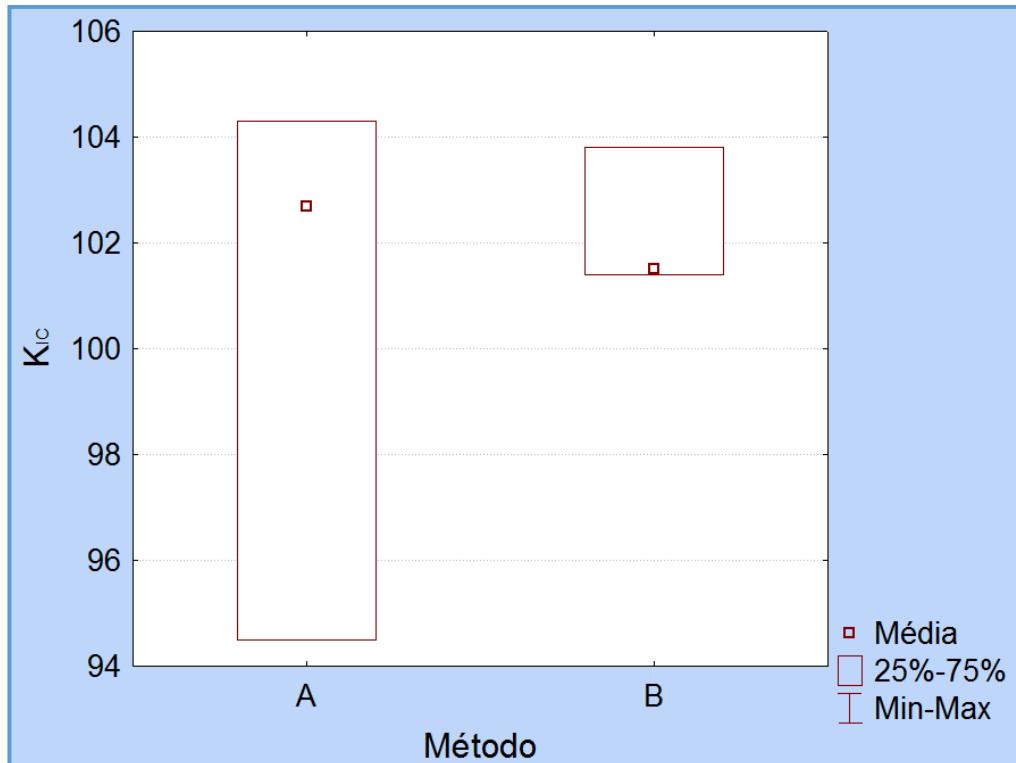


Figura 4.24 - *Box plot* referente aos valores de  $K_c$  em função dos métodos avaliados.

Tabela 4.11 - Resultados da ANOVA para planejamento simples proposto para determinação do valor de  $K_c$ .

Fator	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F	p
Intercepto	61651,21	1	61651,21	4182,106	0,000000
Método	4,51	1	4,51	0,306	0,609769
Erro	58,97	4	14,74		
Total	61714,69	6			

A normalidade dos resíduos foi testada utilizando-se um gráfico de probabilidade normal. Pode-se observar na Fig. 4.27 que os valores dos resíduos não estão dispostos sobre a reta teórica, sendo indicativo de que a hipótese de normalidade da distribuição não pode ser aceita. Assim sendo, testes estatísticos não paramétricos devem ser conduzidos.

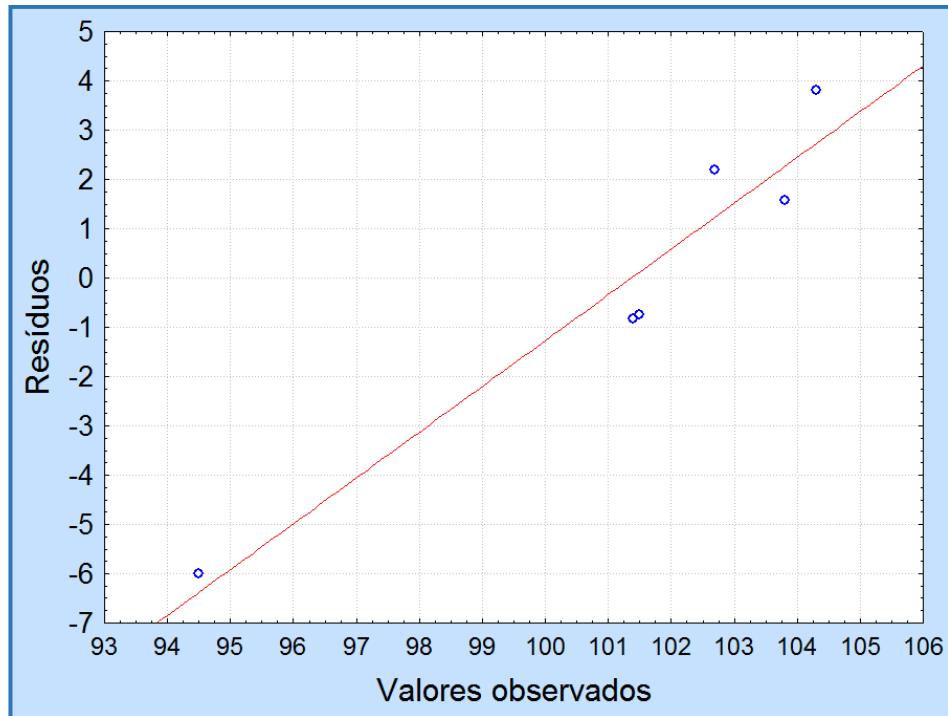


Figura 4.25 - Gráfico de resíduos x valores observados de  $K_{Ic}$ .

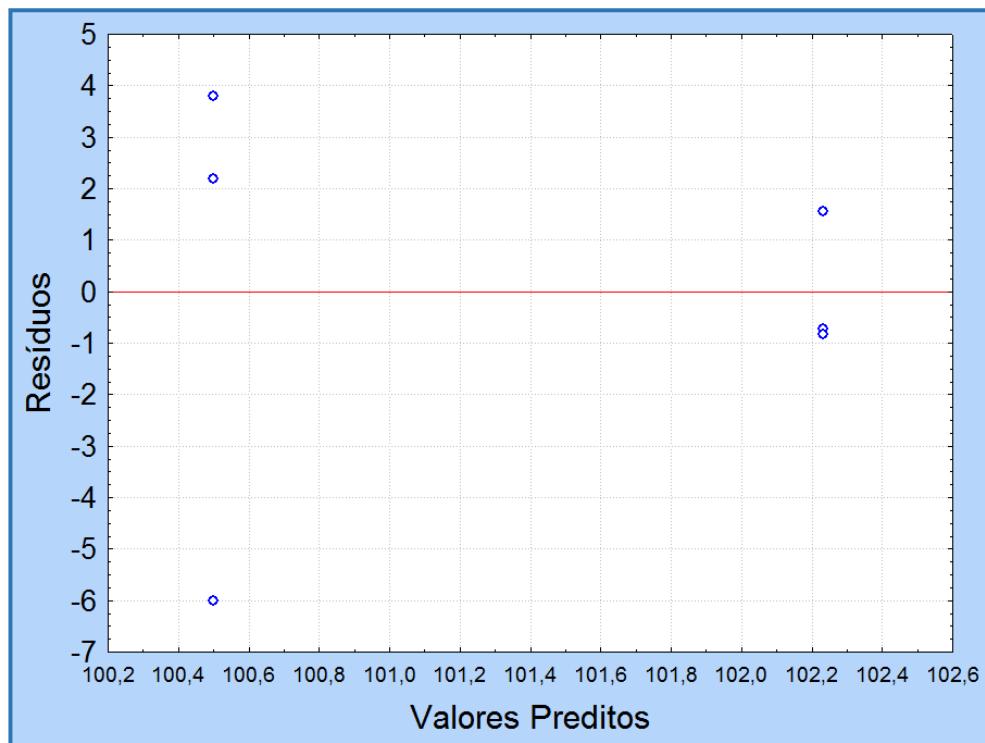


Figura 4.26 - Gráfico de resíduos x valores preditos de  $K_{Ic}$ .

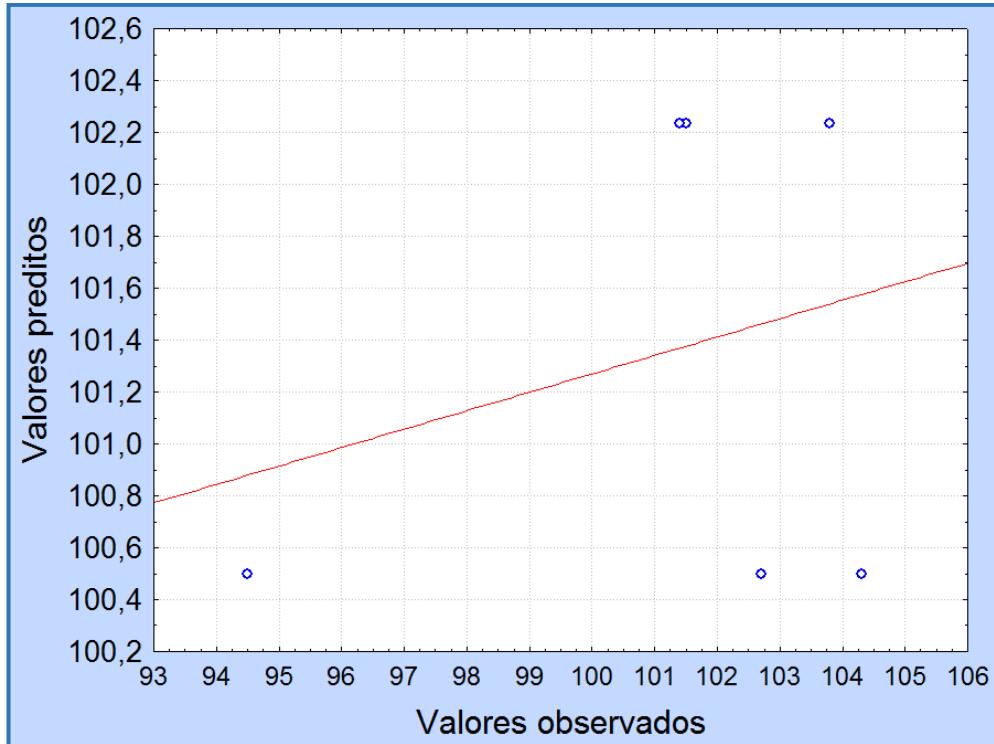


Figura 4.27 - Gráfico de valores preditos x valores observados de  $K_{IC}$ .

O teste U de Mann-Whitney foi aplicado para comparar duas amostras independentes. O valor de  $p$  resultante foi de 0,827259 indicando que os valores médios de  $K_{IC}$  fornecidos por ambos os métodos são estatisticamente iguais, conforme mostra a Tab. 4.12.

Tabela 4.12 - Resultados do teste U de Mann-Whitney para o planejamento simples proposto para determinação do valor de  $K_{IC}$ .

Fator	Amostra 1	Amostra 2	U	Z	p
$K_{IC}$	10,000000	11,000000	4,000000	-0,218218	0,827259

A partir da Fig. 4.28, foi possível notar elevada similaridade na macroestrutura do material na superfície de fratura nos corpos de prova C(T) e SNTT. Nota-se a presença de microvazios com formatos e dimensões semelhantes em ambas factografias, indicando que em ambos os ensaios, a falha do material se deu de forma parecida.

Na Figura 4.29, nota-se uma comparação das imagens da superfície de fratura em uma região longe da transição pré-trinca/fratura abrupta para os corpos de prova dos dois métodos analisado. Observou-se que apesar do corpo de prova C(T) apresentar microvazios menos alongados que no SNTT, a profundidade verificada em ambos os casos foi semelhante

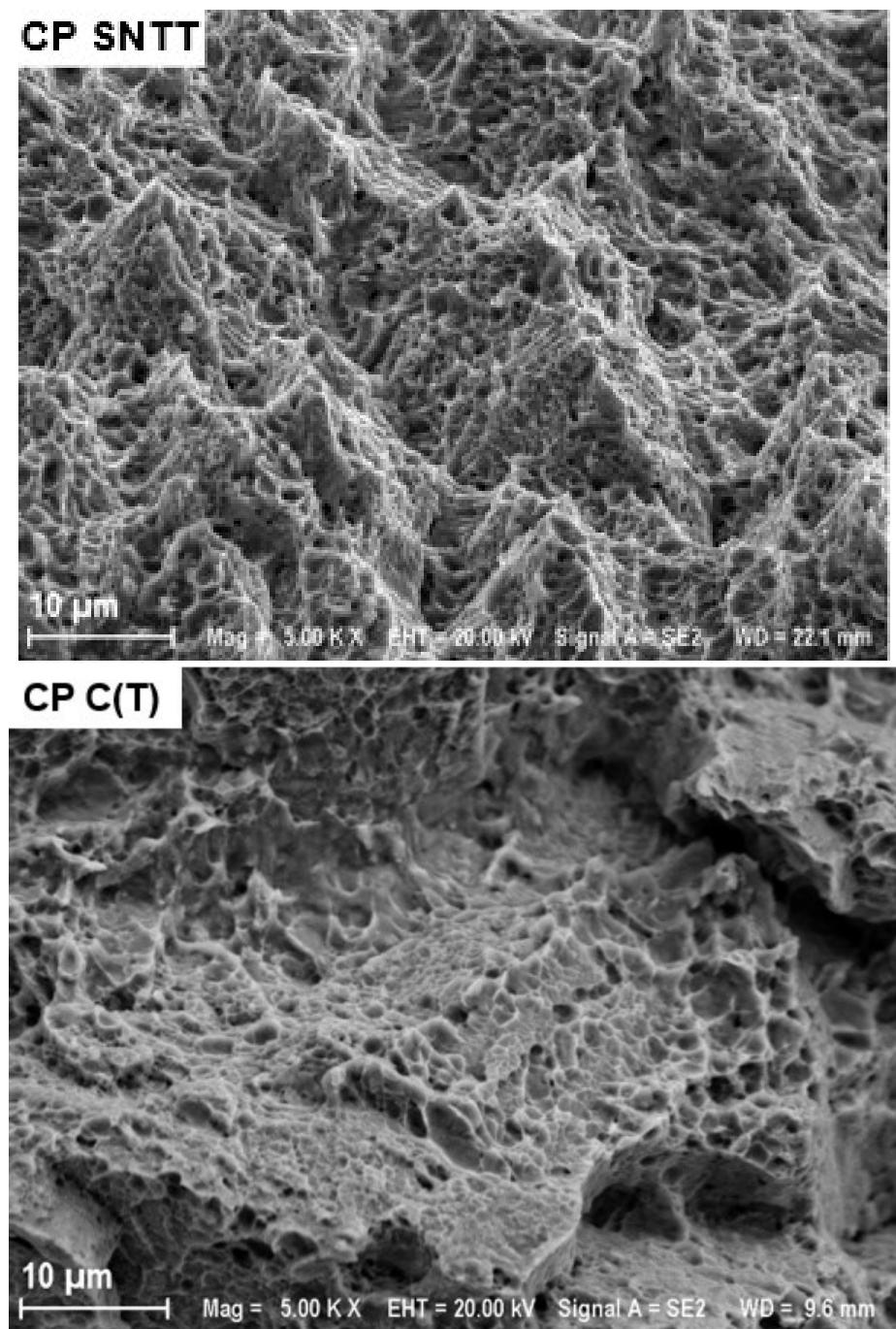


Figura 4.28 - Superfícies de fratura observadas nos corpos de prova SNTT e C(T) em uma região próxima à pré-trinca.

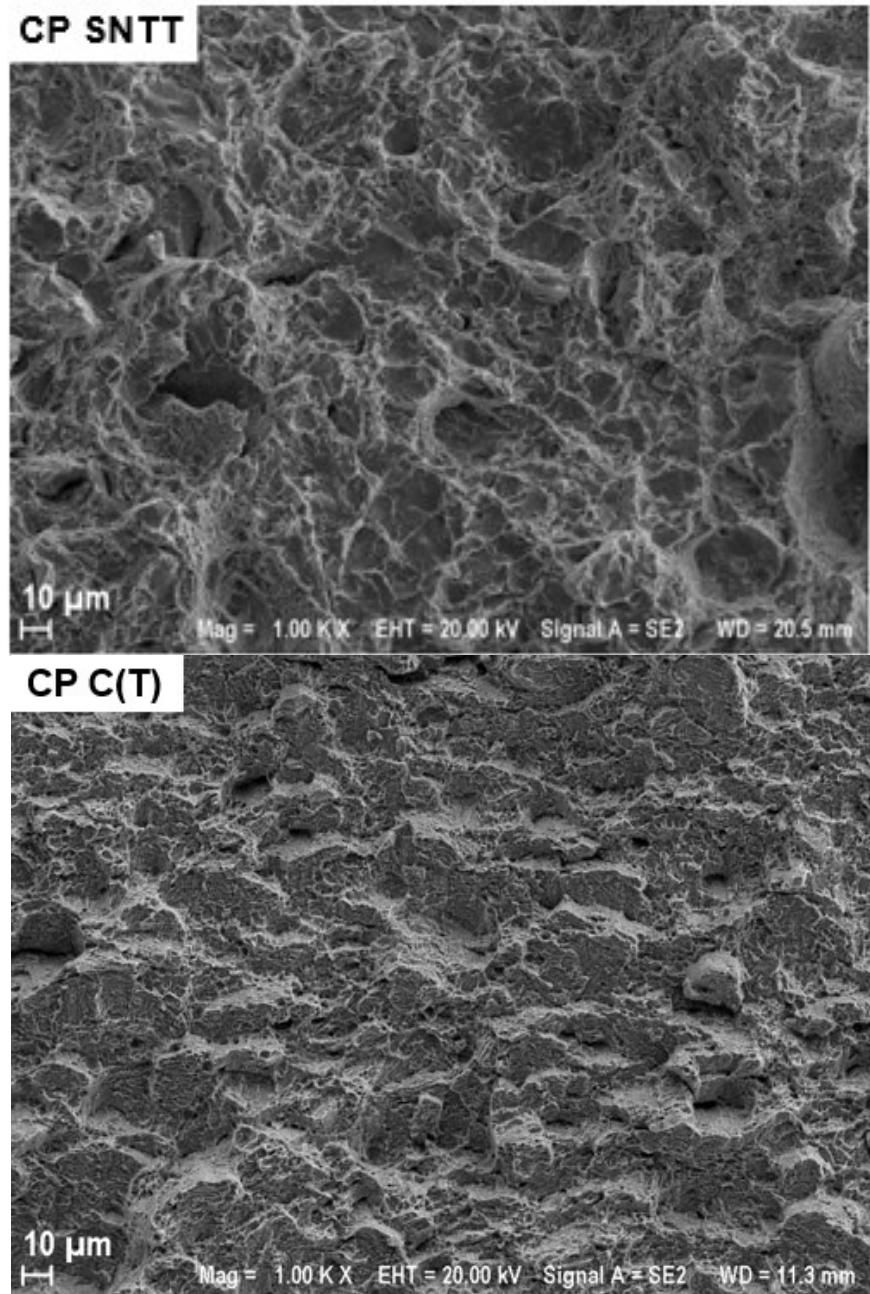


Figura 4.29 - Superfícies de fratura observadas nos corpos de prova SNTT e C(T) em uma região longe da pré-trinca.

#### 4.6 Comparação dos resultados com a literatura

A Tabela 4.13 mostra resultados apresentados por Wang et. al (2008) para diversos materiais e os resultados obtidos nesse trabalho. É possível notar que os valores obtidos utilizando o método SNTT são bem próximos dos valores obtidos via método convencional, sendo que a maior diferença relativa foi de 1,7 %. Concluiu-se então que o método SNTT é capaz de fornecer valores de tenacidade à fratura com adequada exatidão.

Tabela 4.13 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com Wang et. al (2008).

Autor(es)	Material	SNTT (MPa $\sqrt{m}$ )	C(T) (MPa $\sqrt{m}$ )	Diferença (%)
Wang et. al (2008)	Aço A302B	55,8	55,0	1,4
Wang et. al (2008)	AA 7475 – T7	51,3	51,0	0,6
Wang et. al (2008)	Grafite	1,0	1,0	0,0
Rodrigues (2020)	AISI 4340	102,2	100,5	1,7

A Tabela 4.14 apresenta uma comparação dos resultados obtidos nesse estudo com aqueles oriundos de trabalhos desenvolvidos por outros autores. São apresentados: o material avaliado e a temperatura de revenimento, caso tenha sido realizado algum tratamento térmico, o método utilizado, o valor médio de  $K_{IC}$  e o respectivo desvio padrão ( $s$ ). A Figura 4.31 ilustra a relação percentual entre o desvio padrão e o valor médio para cada um dos resultados.

Tabela 4.14 - Comparação dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles oriundos de outras pesquisas realizadas por outros autores.

Autor (es)	Material [ $T_{reven.}$ (°C)]	Método	$K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$s$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1 Rodrigues (2020)	AISI 4340 [420]	SNTT	102,2	1,4
2 Rodrigues (2020)	AISI 4340 [420]	ASTM E399	100,5	5,3
3 Li et. al (2018)	AISI 4340 [500]	ASTM E399	127,7	3,5
4 Li et. al (2018)	AISI 4340 [420]	ASTM E399	91,7	3,3
5 Junior (2014)	AA 7050-T7 LT	ASTM E399	44,7	1,2
6 Junior (2014)	AA 7050-T7 TL	ASTM E399	38,0	2,2
7 Junior (2014)	AA 2050-T84 LT	ASTM E399	41,9	2,2
8 Junior (2014)	AA 2050-T84 TL	ASTM E399	32,5	1,6

Por meio da Fig. 4.30 é possível concluir que o resultado do método SNTT, apresentado nesse trabalho, exibe a melhor repetibilidade dentre aqueles encontrados na literatura. Esse fato vai de acordo com Wang et. al (2004) que inferiram que a incerteza associada aos valores de  $K_{IC}$  fornecidos pelo método SNTT deveriam ser menores que a obtida pelo método convencional. As menores relações percentuais obtidas nos resultados utilizando o método convencional (barras 3 e 5) são aproximadamente 52 % maiores que a relação obtida pelo resultado utilizando o método SNTT. Wang et. al (2004) afirmam que a melhor repetibilidade dos valores de  $K_{IC}$  está associada à longa frente de trinca que se propaga no corpo de prova

e ao estado plano de deformação observado. Ainda, eles afirmam que isso se deve ao crescimento uniforme da trinca e seu crescimento consistente.

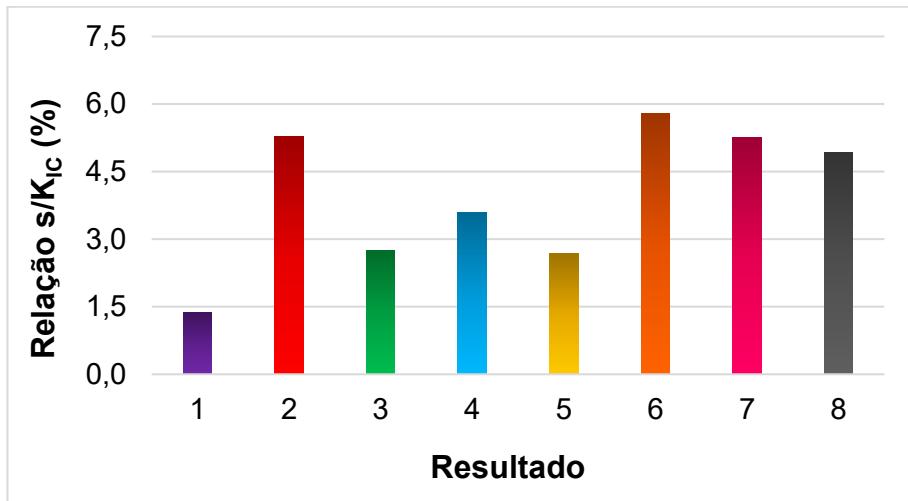


Figura 4.30 - Gráfico de barras indicando o percentual que o desvio padrão representa em relação ao valor médio do  $K_{Ic}$ , para os trabalhos citados na Tab. 4.10.

Ainda, Li et. al (2018) determinaram a tenacidade à fratura do aço AISI 4340 realizando tratamento térmico similar ao desse trabalho (barra de número 4). A Figura 4.31 mostra os valores médios de  $K_{Ic}$  e o desvio padrão, representado pela barra de erros, para o AISI 4340. A diferença percentual entre os valores médios obtidos pelo método SNTT e aquele obtido via método convencional por Li et. al (2018) foi de 10,3 %. Entretanto, é importante ressaltar que mesmo os resultados obtidos utilizando o método convencional para a mesma condição do material, apresentaram uma diferença de aproximadamente 8,7 %.

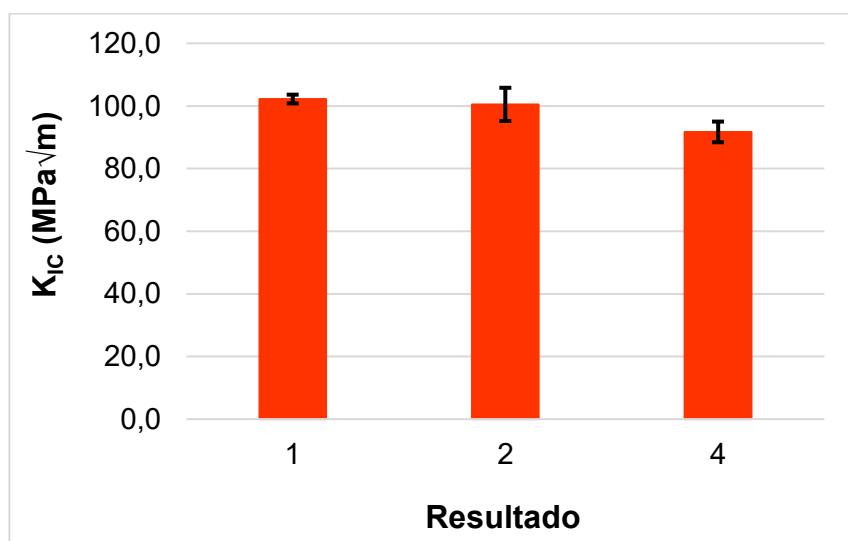


Figura 4.31 - Gráfico de barras indicando os valores médios para os resultados obtidos nesse trabalho e por Li et. al (2018).

Uma justificativa plausível para essa diferença deve ser devida ao processamento do material. Apesar de terem composições químicas semelhantes, os limites de escoamento e de resistência máxima à tração obtidos por Li et. al (2018) foram de 1320 MPa e 1452 MPa, respectivamente. Esses valores se diferem aproximadamente 2,6 % e 4,0 % dos valores obtidos nesse trabalho.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Este trabalho obteve resultados válidos de  $K_{IC}$  para o aço AISI 4340 utilizando o método SNTT. Para tanto, foi desenvolvida e documentada uma metodologia composta por duas etapas: o processo de abertura de pré-trinca e o carregamento monotônico até a fratura do corpo de prova. Em ambas as etapas, foram utilizadas equações de flexibilidade elástica e taxa de alívio de energia para controle e cálculo dos parâmetros do ensaio. Os resultados obtidos foram comparados com àqueles decorrentes da aplicação do método convencional proposto na ASTM E399 (ASTM, 2019), ao se ensaiar corpos de prova C(T). A seguir são apresentadas as principais conclusões desse trabalho:

- a) Foi possível determinar o valor de  $K_{IC}$  do AISI 4340 utilizando o método SNTT. Sua validade foi verificada ao se realizar a ANOVA, a qual indicou que os valores de  $K_{IC}$  fornecidos pelo método convencional, proposto na ASTM E399 (ASTM, 2019), e aqueles decorrentes do método SNTT são estatisticamente iguais, para uma confiabilidade estatística de 95 %.
- b) O  $K_{IC}$  obtido pelo método SNTT para o AISI 4340 foi de  $102,2 \pm 2,8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Para o pior caso, a incerteza expandida representou 1,6 % do valor médio. Em contraste, para o método convencional o  $K_{IC}$  foi de  $100,5 \pm 5,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Em ambos os casos a probabilidade de abrangência é de 95 %. A incerteza do método SNTT foi 25 % menor que a do método convencional.
- c) Os valores de  $K_{IC}$  obtidos pelo método SNTT apresentaram boa exatidão com um erro sistemático de 1,7 % em relação ao método convencional. Sabendo que a incerteza apresenta valor consideravelmente baixo em comparação à média, o erro máximo do método SNTT em relação ao método convencional é igual ao erro sistemático.

- d) A repetibilidade associada ao  $K_{IC}$  para o método SNTT foi melhor que aquela observada para o método convencional. O desvio padrão representou cerca de 5,3 % do valor médio no método convencional, enquanto que no método SNTT representou aproximadamente 1,4 %.
- e) A repetibilidade associada ao torque e ao ângulo de torção no momento da fratura foram, respectivamente, de 4,6 N.m e 0,27°. Estes valores representam cerca de 1,3 % e 4,5 % do menor valor de torque e ângulo verificados.
- f) Os valores obtidos do comprimento de pré-trinca para os corpos de prova 1, 2 e 3 foram respectivamente de  $1,119 \pm 0,033$  mm,  $0,932 \pm 0,048$  mm e  $0,964 \pm 0,063$  mm para uma probabilidade de abrangência de 95 %. Como o valor desejado era de 0,67 mm, concluiu-se que a metodologia utilizada para estimativa do ângulo de torção final da abertura da pré-trinca deve ser revista.
- g) Não houve crescimento uniforme de trinca ao longo de todo o entalhe. As regiões próximas às extremidades dos corpos de prova apresentaram trincas menores que a região central do entalhe. Isso indicou que há um “efeito de borda” sobre a nucleação e propagação da pré-trinca.
- h) Na superfície de fratura foram encontrados microvazios, os quais indicaram que na região próxima à transição pré-trinca/fratura abrupta houve modo I de falha. Por outro lado, em uma região mais afastada, foram verificados microvazios alongados e menos profundos, indicando que além de modo I, o modo III também foi presente. Adicionalmente, foi observado que a pré-trinca se propaga intragranularmente, seguindo os antigos contornos de grão.
- i) A análise da superfície de fratura dos corpos de prova de ambos os métodos indicou que a morfologia da fratura em ambos os casos foi semelhante.
- j) O uso de extensômetros eletro-resistivos se mostrou promissor para medição do ângulo de torção do corpo de prova nos ensaios SNTT, apresentando valor próximo ao que seria indicado pelo extensômetro eletromecânico (diferença máxima de 5,2 %). No ensaio preliminar a diferença máxima verificada foi cerca de 9,4 %.
- k) Os resultados do método SNTT, quando comparados com resultados obtidos via método convencional por diversos autores, apresentaram melhor repetibilidade. O valor do desvio padrão do método SNTT foi 52 % menor que os valores de desvio padrão encontrados em literatura.

# CAPÍTULO VI

## PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio do estudos e conclusões obtidos nesse trabalho, são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Concepção, projeto e fabricação de um equipamento capaz de realizar ensaios SNTT.
- Estudos adicionais devem ser realizados visando quantificar a contribuição da parcela do entalhe que apresenta crescimento de pré-trinca sem “efeito de borda” sobre o ângulo de torção do corpo de prova.
- Aprimorar a utilização do ensaio preliminar como ferramenta de determinação do critério de parada da abertura de pré-trinca.
- Aplicar o SNTT para determinar o  $K_{IC}$  de outros materiais.
- Avaliar o efeito da anisotropia do material sobre o valor de  $K_{IC}$  obtido via método SNTT.
- Avaliar o efeito da fragilização por hidrogênio em  $K_{IC}$  por meio da realização de ensaios SNTT *in situ*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR ISSO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração”. Rio de Janeiro, 2017, 20p.

ANDERSON, T. L., “**Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**”. 3<sup>a</sup> Ed. New York: CRC Press, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420058215>

ASTM E8/E8M-16a. “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”. **ASTM International**, 2018.

ASTM E92, “Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2017.

ASTM E322, “Standard Specification for Steel Bars, Alloy, Standard Grades”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2013.

ASTM E399, “Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2019.

ASTM E813-81, “Standard Test Method for  $J_{IC}$ , a measure of fracture toughness”. **ASTM International**, West Conshohocken, 1982.

ASTM E1290, “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2013.

ASTM E1820, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”. **ASTM International**, West Conshohocken, 2018.

ASTM E1823, "Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing", **ASTM International**, West Conshohocken, 2013.

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, **JCGM 101**, "Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method", 90p., 2008.

BROWN, W. F., SRAWLEY, J. E., "In: Plane Strain crack toughness testing of high strength metallic materials". **ASTM STP 410**. American Society for Testing and Materials, 1966. p. 1-65. <https://doi.org/10.1520/STP44663S>

BURDEKIN F.M., STONE D.E.W., "The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding materials", **Journal of strain analysis**, v.1, p.145-153, 1966. <https://doi.org/10.1243/03093247V012145>

CLARKE G. A., ANDREWS, W. R., PARIS, P.C., SCHMIDT, D. W., "Single specimen tests for  $J_{IC}$  determination". In: **Mechanics crack growth. ASTM STP 590**. American Society for Testing and Materials, 1976, p. 27-42. <https://doi.org/10.1520/STP33937S>

GRIFFITH, A. A., "The phenomena of rupture and flow in solids. **Philos Trans Roy Soc Lond**, Ser A, 1920. 221:163-97. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>

HAAG, J. "Propagação de Trincas por Fadiga em Arames de Alta Resistência Mecânica". 2012. 55p. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Metalurgia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO) "Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008". **INMETRO**, 2012.

IRWIN, G.R., "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate". **J Appl Mech**, 1957. 24:361-64.

IRWIN, G. R., KIES, J. A., SMITH, H.L., "Fracture strengths relative to onset and arrest of crack propagation". **Proc Am Soc Test Mater**, 1958. 58:640-60.

IRWIN, G. R., "Plastic zone near a crack and fracture toughness". In: **Proceedings of the 7<sup>th</sup> sagamore ordnance materials conference**, 1960. p. 463-78.

ISO 18265:2013, "Metallic Materials – Conversion of hardness values", **International Organization for Standardization**, 2013.

JOHNSON, H. H., "Calibrating the electric potential method for studying slow crack growth". **Mater Res Stand**, 1965. 5:442-5.

JOYCE, J. A., GUDAS, J. P., "Computer interactive  $J_{IC}$  testing of navy alloys". **Elastic-plastic fracture. ASTM STP 668**. American Society for Testing and Materials, 1979. p. 451-68. <https://doi.org/10.1520/STP35843S>

LI, H. F., WANG, S. G., ZHANG, P., QU, R. T., ZHANG, Z. F., "Crack propagation mechanisms of AISI 4340 steels with different strength and toughness". **Materials Science and Engineering: A**, Vol. 729, 2018. p. 130-140. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.056>

LÓPEZ, J. M. M. "Modelagem do Trincamento de Misturas Asfálticas pelo Método dos Elementos Discretos". 2010. 114p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MEDINA, J. A. H., DE CASTRO, J. T. P. "Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica". 2014. 203p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

RICE, J. R., "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks". **J Appl Mech**, 1968. 35:379-86. <https://doi.org/10.1115/1.3601206>

RODRIGUES, G. B., FREITAS, M. A. F. M., HWANG, H. F., FRANCO, S. D., FILHO, W. W. B., ARENCIBIA, R. V., "Evaluation of uncertainty associated with fracture toughness of Inconel 718 using the SNTT method". **COBEM 25<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering**, 2019. <https://doi.org/10.26678/ABCM.COSEM2019.CO2019-0439>

SRAWLEY, J. E., JONES, M. H., BROWN, W.F., "Determination of plane strain fracture toughness". **Materials research and standards**, vol. 7. American Society for Testing and Materials, 1967. p. 261-6.

U.S. PATENT 09/888,937: WANG, J. A.; LIU K. C.; "**Fracture toughness determination using spiral-grooved cylindrical specimen and pure torsional loading**", 2003.

VILLARES METALS S.A. "Aços para trabalho a frio VD-2". Aços ferramenta Villares, Catálogo técnico, 1992.

WANG, J. A.; LIU K. C. and McCABE, D. E; "Using torsional bar testing to determine fracture toughness". **ASME**, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00352.x>

WANG, J. A.; LIU K. C. and McCABE, D. E., "A New Approach to Evaluate Fracture Toughness of Structural Materials". **ASME**, Vol. 126, 2004, pp. 534-540. <https://doi.org/10.1115/1.1804202>

WANG, J. A.; LIU K. C. and McCABE, D. E; "An innovative technique for evaluating fracture toughness of graphite materials". **ASME**, 2008.

WANG, J. A.; LIU K. C.; REN F.; "An innovative technique for evaluating the integrity and durability of wind turbine blade composites". **Materials Science and Technology Division**, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2010. 72p. <https://doi.org/10.2172/988730>

WANG, J. A.; TAN, T.; JIANG, H.; ZHANG, W.; FENG, Z.; "Developing fatigue pre-crack procedure to evaluate fracture toughness of pipeline steels using spiral notch torsion test". **Materials Science and Technology Division**, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2012. 117p. <https://doi.org/10.2172/1055086>

WANG, J. A., REN, F.; TIN, T. LIU, K. C. "The development of in situ fracture toughness evaluation techniques in hydrogen environment", **International Journal of Hydrogen Energy**. Vol. 40, No 4, pp. 2013-2024, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.147>

WANG, J. A.; LIU K. C.; "The development of in situ fracture toughness evaluation techniques in hydrogen environment". **ASME**, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.147>

WANG, J. A. "Fracture Toughness Evaluation for Sandia Mock-up Stainless Steel Canister Weldment Using Spiral Notch Torsion Fracture Toughness Test", **Materials Science & Technology Division**. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, United States of America, 2019. <https://doi.org/10.2172/1502533>

WELLS, A. A., "Application of fracture mechanics at and beyond general yielding". **Br Weld J**, 1963. 10:563-70.

WILLIAMS, M. L., "On the stress distribution at the base of a stationary crack". **J Appl Mech**, 1957. 24:109-14.

ZHU, X. K., JOYCE, J. A., "Review of fracture toughness (G, J, CTOD, CTOA) testing and standardization". **Engineering Fracture Mechanics**, p. 1-42, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2012.02.001>

## ANEXO A - Certificado de calibração do Paquímetro Digital (página 1/2)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO  
DE  
METROLOGIA**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Calibração  
NBR ISO/IEC  
17025

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 07625/13**

Cliente : "UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA."  
Endereço : Avenida João Naves de Avila, 2121 - Uberlândia - MG.  
Ordem de serviço: 068.189

1 - Objeto Calibrado

**PAQUÍMETRO DIGITAL**  
Fabricante: Mitutoyo  
Código: 500-196-208  
N.º de Série: 10901281  
Faixa nominal: 150 mm  
Resolução: 0,01 mm  
Identificação do proprietário: Não consta

2 - Padrões utilizados na Calibração:

Blocos padrão Certificado N.º 00199/13 - RBC - Mitutoyo	Número: 00112 Validade: 01/2014
Relógio apalpador Certificado N.º 00997/13 - RBC - Mitutoyo	Número: LCF233 Validade: 08/2013
Padrão escalonado para paquímetro Certificado N.º 05825/13 - RBC - Mitutoyo	Número: 010259 Validade: 12/2013

3 - Procedimento de Medição: PML - 0013 - Versão 5

Os valores de indicação do paquímetro foram verificados comparativamente com padrão escalonado e Blocos-padrão e a leitura da indicação tornada no paquímetro.

Data da calibração: 23 de Julho de 2013  
Data da emissão: 23 de Julho de 2013

Carlos Kazuo Ispitake  
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de acreditação para CÓCRE que inclui a competência do laboratório e comprova sua realizabilidade e possíveis variações de medida (inciso Sistema Internacionais de Unidade - SI).  
A reprodução deste Certificado só poderá ser feita a depender da aprovação por escrito da Mitutoyo.  
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao Instrumento aferidor e à calibração nas condições especificadas, não sendo extensos a quaisquer outras.

Mitutoyo Corrêa Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo André - CEP 04726-000 - São Paulo - SP - Telone: (11) 5843-0000 - Fax: (11) 5841-0732  
Av. das Américas, Rod. Presidente Dutra - KM 1350 - Barra Funda - CEP 06300-000 - Suzano - SP - Tel: (11) 4748-0888 - Fax: (11) 4748-0886 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Laboratório Tel: (11) 4748-5880 - Fax: (11) 4748-5880 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna Tel: (11) 4748-0987 - Fax: (11) 4748-0980 - E-mail: assistencia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa Tel: (11) 5843-0027 - Fax: (11) 5843-0028 - E-mail: sct@mitutoyo.com.br

**ANEXO A - Certificado de calibração do Paquímetro Digital (página 2/2)**

**micutoyo**  
Mitsutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 07625/13**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

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

Pag.: 2 / 2

**4 - Resultado da calibração:** O resultado é a média das calibrações.

Medida Externa	Medida Interna
Padrão ( mm )	Padrão ( mm )
Indicação no Instrumento ( mm )	Indicação no Instrumento ( mm )
Incerteza de Medição ( mm )	Incerteza de Medição ( mm )
1,1	20,0
1,5	50,0
1,9	100,0
4,0	150,0
8,0	0,02
16,0	
20,0	
50,0	
75,0	
100,0	
150,0	
<b>Fator de abrangência ( k )</b>	2,03
<b>Graus de liberdade ( V<sub>eff</sub> )</b>	96
<b>Fator de abrangência ( k )</b>	2,00
<b>Graus de liberdade ( V<sub>eff</sub> )</b>	infinito

**Outros Itens:**

Item	Resultado ( mm )	Incerteza de Medição ( mm )	Fator de abrangência ( k )	Graus de liberdade ( V <sub>eff</sub> )
Ponto zero	0,00	0,01	2,00	infinito
Ressalto	0,00	0,01	2,00	infinito
Profundidade	0,01	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Orelha	0,00	0,01	2,00	infinito
Paralelo da Boca	0,00	0,01	2,00	infinito

**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  $V_{eff}$  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: (20,0 ± 0,5)°C.

## ANEXO B - Certificado de calibração do Projetor de Perfil (página 1/4)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO  
DE  
METROLOGIA**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 12137/12**

Interessado : "FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO" Pág. 1/4  
Endereço : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.  
Local da calibração : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.

Ordem de Serviço : 034.514/001

**1 - OBJETO CALIBRADO**

**PROJETOR DE PERFIL**

Fabricante : Mitutoyo  
Código : 302-714A  
Modelo : PJA3000  
No. de Série : D00101012  
Tambor Micrométrico  
Código : 164-164 N.º série : 000636  
Código : 164-164 N.º 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**

N.º de Série : 21164  
Certificado N.º : 01647/11 Validade: 30/02/2013

N.º de Série : 24364  
Certificado N.º : 08755/11 Validade: 30/06/2013

**Padrão Angular**

N.º de Género : RET 1  
Certificado N.º : 110381/101 Validade: 30/06/2013

**3 - PROCEDIMENTO DE MEDIDAÇOES : 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 : 22 de Agosto de 2012  
Data de emissão : 05 de Setembro de 2012

*Carlos Kazuo Suedake*  
Gerente do Opto. de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de documentação para o uso que autoriza a utilização e a utilização da sua validade e a sua validade é condicionada ao cumprimento das normas do Sistema Internacionais de Unidade - SI.  
A reprodução deste Certificado só poderá ser feita a depender do aprovado por escrito da Mitutoyo.  
O seu uso deve ser limitado ao envio de instrumentos eletromecânicos à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a qualquer lotes.

Endereço Central: Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, 38400-0000 - Belo Horizonte - MG - Fone: (31) 3641-0788  
Endereço: Rod. Inácio Tótevly, 1500 - Bairro Piatto - CEP: 06020-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-6858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-6957 - Fax: (11) 4746-5900 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

**ANEXO B - Certificado de calibração do Paquímetro Digital (página 2/4)**

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 12137/12**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

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

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

**4.1 - Resultado Ampliação**

Lente de Ampliação de 10 X      Número lente: 013012

Pág. 2/4

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

**LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO BRASIL**

• Escritório Central: Av. Jólio Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722  
 • Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffo - CEP: 06620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5036 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br  
 Laboratório: Tel.: (11) 4746-5960 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br  
 Assessoria Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-0937 - Fax: (11) 4746-0980 - E-mail: assessoria@mitutoyo.com.br  
 Assessoria Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

**ANEXO B - Certificado de calibração do Paquímetro Digital (página 3/4)**

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

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

Pág. 3/4

**4 -RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**

**4.2 - Resultado da Indicação**

Eixo " X "			Eixo " Y "			
Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )	Indicação ( mm )	Resultado ( mm )	Incerteza de medição ( mm )	
0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002	
2,500	2,500		2,500	2,499		2,499
5,100	5,100		5,100	5,100		5,100
7,700	7,700		7,700	7,701		7,701
10,300	10,300		10,300	10,300		10,300
12,900	12,900		12,900	12,900		12,900
15,000	15,000		15,000	15,000		15,000
17,600	17,600		17,600	17,600		17,600
20,200	20,200		20,200	20,200		20,200
22,800	22,800		22,800	22,800		22,800
25,000	25,000		25,000	25,000		25,000
30,000	30,000		30,000	30,000		30,000
35,000	35,001		35,000	35,000		35,000
40,000	40,000		40,000	40,001		40,001
45,000	45,000		45,000	45,001		45,001
50,000	50,001	50,000	50,001	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 Central:** Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04720-002 - São Paulo - SP - Telefax: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-0788  
**Endereço:** Ptd. Indústria Têxtil, 1550 - Gávea - Rio de Janeiro - RJ - Tel.: (11) 4746-6068 - Fax: (11) 4746-6096 - E-mail: susano@mitutoyo.com.br  
 Laboratório: Tel.: (11) 4746-6960 - Fax: (11) 4746-6960 - E-mail: memória@mitutoyo.com.br  
 Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5980 - E-mail: assistec@mitutoyo.com.br  
 Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

**ANEXO B - Certificado de calibração do Paquímetro Digital (página 4/4)**

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12**

**REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO**

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

**4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :** 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	60 ° 00 '			
90	90 ° 00 '			
120	110 ° 50 '			
150	140 ° 50 '			
180	180 ° 00 '	0 ° 01 '	2,20	11
210	210 ° 00 '			
240	240 ° 01 '			
270	270 ° 00 '			
300	300 ° 01 '			
330	330 ° 02 '			
360	360 ° 02 '			

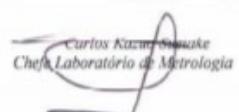
**5 - INCERTEZA DE MEDAÇÃO :**

A incerteza expandida da medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k$ , o qual para uma distribuição com  $V_{eff}$  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 : ( 19,6 ± 0,5 ) °C.

## ANEXO C - Certificado de calibração da Máquina de Medir por Coordenadas (página 1/4)

 Mitutoyo Sul Americana Ltda.	<b>LABORATÓRIO DE METROLOGIA</b> REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO	Calibração NBR ISO/IEC 17025			
<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO</b> No. 07081/13		 CAL 0031			
<p><b>Cliente :</b> FUNDACAO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA <b>Endereço :</b> Avenida Amazonas, 2121 - Campus Umuarama - Uberlândia - MG. - CEP - 38400-902</p> <p><b>Ordem de Serviço :</b> 035.766/001</p> <p><b>I. Objeto Calibrado :</b></p> <p>Máquina de Medição por Coordenadas Fabricante : Mitutoyo MMC Modelo : BRM-443 No de Série : 0021902 / Código : 196-667-65 Identif. do Cliente: N.C Faixa Nominal : 400 x 400 x 300 mm Contador Digital / Controlador Modelo : N.C No Série : N.C Resolução : 0,0005 mm Cabeçote Modelo : MH201 No Série : 7F8912 Probe Modelo : TP20 No Série : 6T4567 Rack Modelo : N.C No Série : N.C Programa de Medição Programa : Geopak Win Versão : 3,0R16 Dongle No. : 10.16436738</p> <p><b>II. Notas:</b></p> <p>1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência <math>k</math>, o qual para uma distribuição <math>t</math> com <math>V_{df}</math> graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.</p> <p>2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.</p> <p>3. Erro = Diferença entre o valor mediido de uma grandeza e um valor de referência.</p> <p>4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.</p> <p>5. A máquina foi calibrada conforme Procedimentos PMI-001/0 revisão 3</p> <p>6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: (20,5 ± 0,5)°C</p> <p>7. Endereço e local da calibração são os mesmos.</p> <p><b>III. Padrões utilizados :</b></p> <table border="0"><tr><td>Padrão Escalonado No Série : 300034 Certificado No : 04980/13 Emitido em : 14/05/2013 Validade : 11/2013</td><td>Termômetro No Série : T1FA016 Certificado No : LV22179/12 Emitido em : 18/06/2012 Validade : 06/2014</td><td>Esfera Padrão No Série : D0106 Certificado No : 00848/12 Emitido em : 09/02/2012 Validade : 02/2014</td></tr></table> <p>Data da Calibração : 28 de Maio de 2013 Data da Emissão : 05 de Julho de 2013</p> <p> Carlos Kazuo Suzuki Chefe do Laboratório de Metrologia</p> <p><b>Pag.: 1 / 4</b></p> <p>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCQRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua credibilidade e padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI). A reprodução deste Certificado só possui seu valor se for feita a depender da aprovação por escrito da Mitutoyo.</p> <p>Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outras.</p> <p>• Endereço Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP: 04129-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722 • Fábrica: Rod. Indú Têmpa, 1555 - Bairro Reflo - CEP: 06620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br LABORATÓRIO: 101, (11) 4746-0000 - Fax: (11) 4746-0060 - E-mail: metrologia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 4746-0907 - Fax: (11) 4746-0900 - E-mail: assistencia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 4849-0007 - Fax: (11) 4849-0008 - E-mail: sra@mitutoyo.com.br</p>			Padrão Escalonado No Série : 300034 Certificado No : 04980/13 Emitido em : 14/05/2013 Validade : 11/2013	Termômetro No Série : T1FA016 Certificado No : LV22179/12 Emitido em : 18/06/2012 Validade : 06/2014	Esfera Padrão No Série : D0106 Certificado No : 00848/12 Emitido em : 09/02/2012 Validade : 02/2014
Padrão Escalonado No Série : 300034 Certificado No : 04980/13 Emitido em : 14/05/2013 Validade : 11/2013	Termômetro No Série : T1FA016 Certificado No : LV22179/12 Emitido em : 18/06/2012 Validade : 06/2014	Esfera Padrão No Série : D0106 Certificado No : 00848/12 Emitido em : 09/02/2012 Validade : 02/2014			

## ANEXO C - Certificado de calibração da Máquina de Medir por Coordenadas (página 2/4)

**Mitutoyo**  
Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cogni de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N°. 0001

**IV. Resultado das Medidas:**

**4.1. Verificações iniciais do equipamento:**

- a. Movimento da Máquina : OK
- b. Condições da área de Medição : OK
- c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d. Limpeza das superfícies de ref. : OK

**4.2. Resultado da Medição:**

**4.2.1. Resultado da medição do eixo "X", ( E1 )**

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1 <sup>o</sup> . Série	2 <sup>o</sup> . Série	3 <sup>o</sup> . Série	Média
30	0,9	0,4	0,2	0,5
110	0,2	-0,7	0,0	-0,2
210	0,0	0,2	-0,4	-0,1
310	0,3	-0,1	0,6	-0,1
370	1,2	0,3	0,7	0,7

*Incerteza de medição expandida ( U ) = ( 0,8 + L/1500 )  $\mu\text{m}$  , onde: L = comprimento em " mm ".*

*Fator de abrangência ( k ) = 2,02*

*Graus de liberdade ( V<sub>eff</sub> ) = 85*

**4.2.2. Resultado da medição do eixo " Y ", ( E2 )**

Comprimento ( L ) ( mm )	Erro ( $\mu\text{m}$ )			
	1 <sup>o</sup> . Série	2 <sup>o</sup> . Série	3 <sup>o</sup> . Série	Média
30	-0,5	-0,1	0,5	0,0
110	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
210	-0,3	1,0	0,2	-0,4
310	0,2	0,1	0,3	0,3
370	1,1	-0,2	1,4	0,8

*Incerteza de medição expandida ( U ) = ( 0,8 + L/3000 )  $\mu\text{m}$  , onde: L = comprimento em " mm ".*

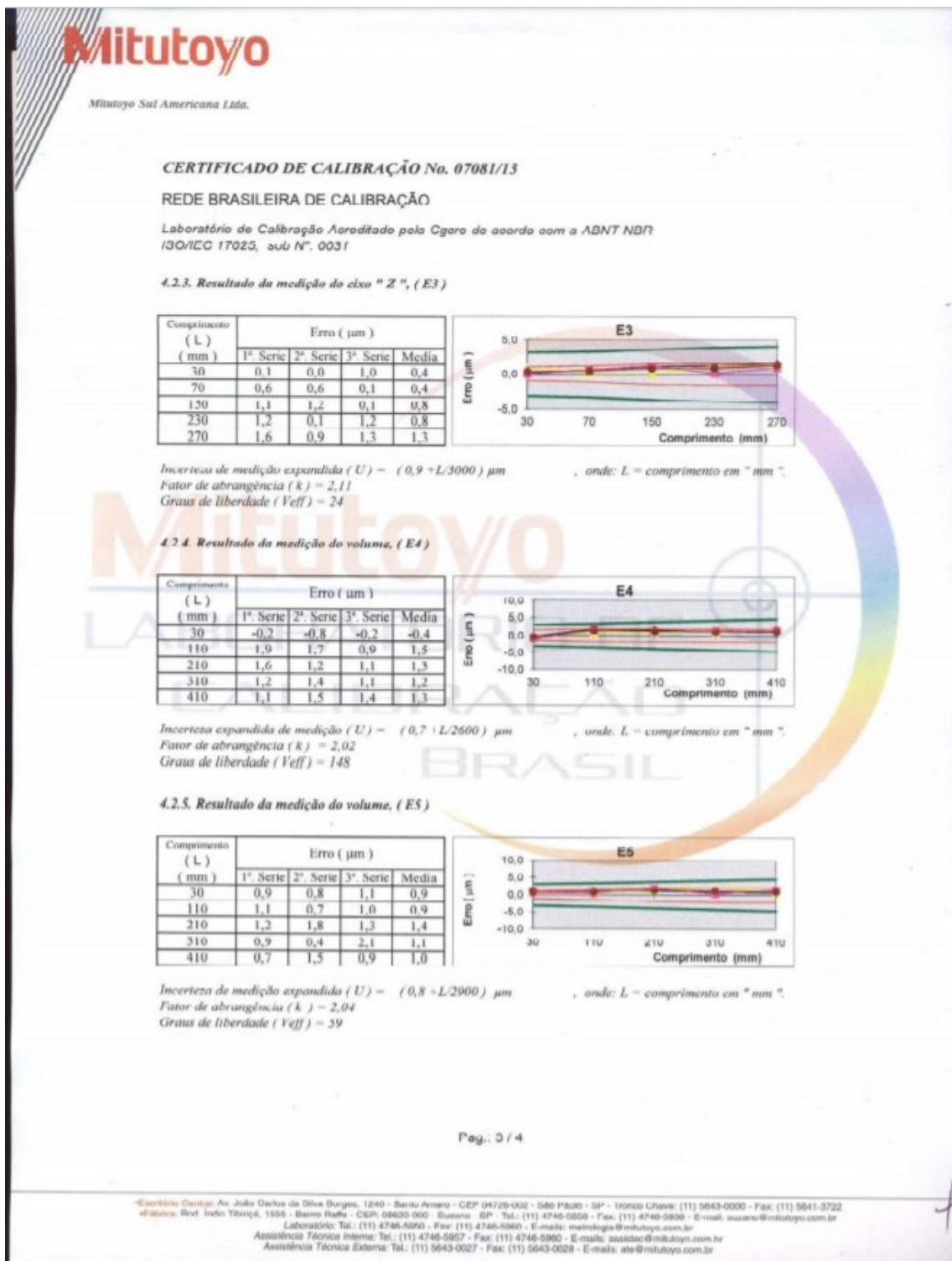
*Fator de abrangência ( k ) = 2,08*

*Graus de liberdade ( V<sub>eff</sub> ) = 33*

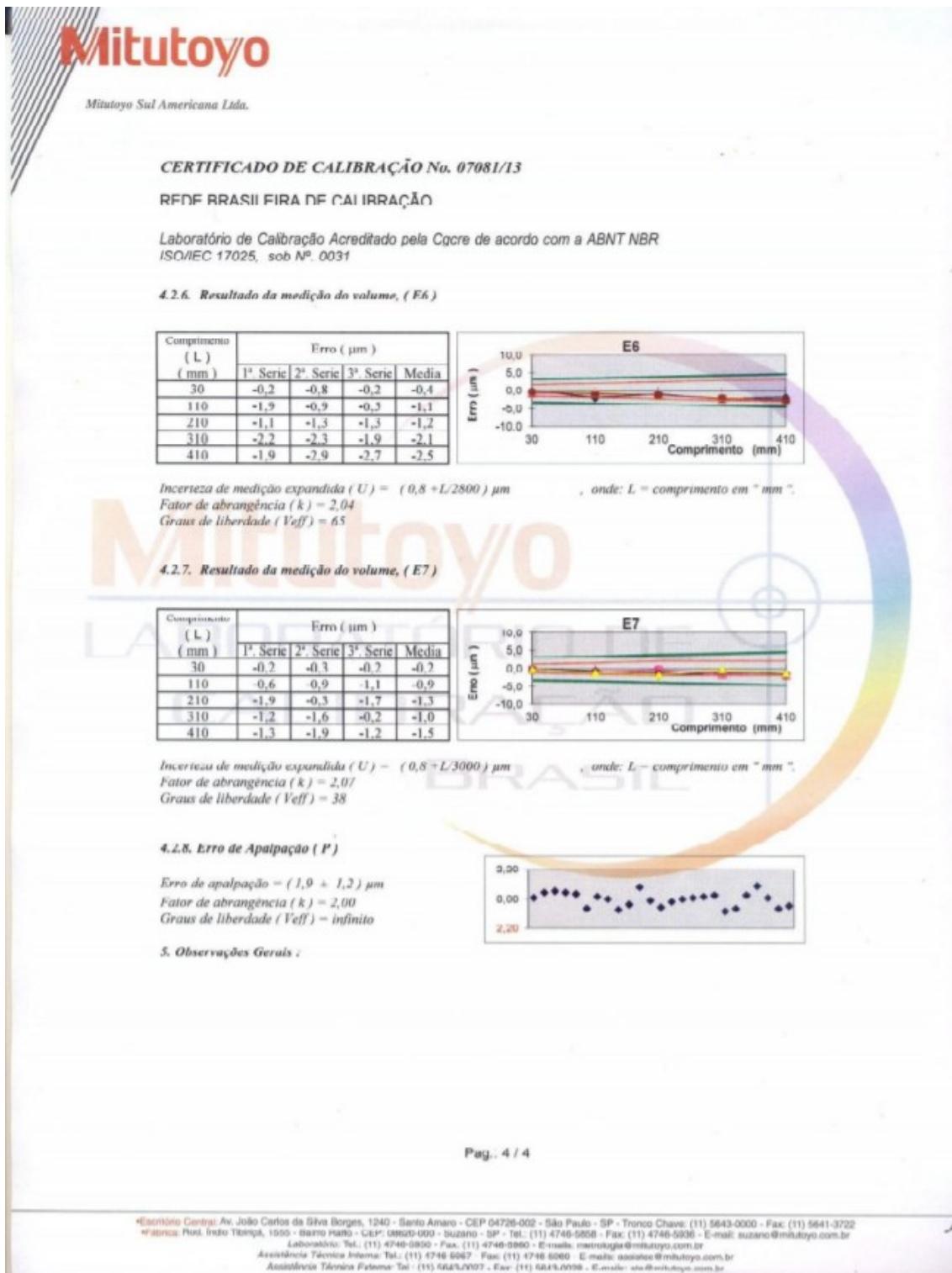
Pág.: 2 / 4

\*Endereço Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - SANTO AMARO - CEP 04720-002 - São Paulo - SP - Telefone: (11) 5540-0000 - Fax: (11) 6641-3700  
\*Endereço: Piso. 1º, Indú. Têxtil, 1550 - Bairro Itaquá - CEP: 09260-000 - Guaporé - SP - Tel.: (11) 4746-6868 - Fax: (11) 4746-6936 - E-mail: suporte@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mail: mstecnia@mitutoyo.com.br  
Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mail: ate@mitutoyo.com.br

## ANEXO C - Certificado de calibração da Máquina de Medir por Coordenadas (página 3/4)



## ANEXO C - Certificado de calibração da Máquina de Medir por Coordenadas (página 4/4)



## ANEXO D - Certificado de calibração do Micrômetro Digital (página 1/2)



### Certificado de Calibração Laboratório Medição Uberlândia

Certificado: 70518/18

Data Calibração: 02/05/2018

OS: 468630-A/2018

1 / 2

**Solicitante:** FUNDACAO DE APOIO UNIVERSITARIO  
RUA ENGENHEIRO DINIZ, 1178, UBERLÂNDIA, MG

**Contratante:** O MESMO

#### Características do Instrumento

Descrição: MICRÔMETRO DIGITAL

Identificação: MIC-04

Marca: MITUTOYO

Nº. Série: 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

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 D - Certificado de calibração do Micrômetro Digital (página 2/2)



### 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 metrolopicas 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

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: Laboratório Medição  
Uberlândia

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 E - Certificado de calibração do Interferômetro Laser (página 1/2)

### CERTIFICATE OF CALIBRATION

Issued By Taylor Hobson Calibration Laboratory

Issue Date: 15-July-2009 Certificate No: 47596

Date of Calibration: 14-July-2009



0026



Taylor Hobson Limited  
2 New Star Road  
Leicester, LE4 9JQ  
England  
Tel: +44 116 2463104  
Fax: +44 116 2463058  
E-Mail: calibration-uk.lei@ametek.co.uk  
Internet: <http://www.taylor-hobson.com>

Page 1 of 2 Pages

APPROVED  
SIGNATORY

C.J.Phillips

Description:	Roughness Standard
Code Number:	112/1534
Serial Number:	8556
Manufactured by:	Taylor Hobson Ltd
Calibrated For:	Taylor Hobson do Brazil Ltd R Gaspar Lourenco 605 CEP Vila Mariana Sao Paulo 04107-001 Brazil
Acting as Agent for:	
Customer Order Number:	THB 1321
Taylor Hobson Order Number:	236710

Previous Certificate Number:	Not Applicable
Records Reference:	Network
Calibration Temperature	20°C ±1°C
Date Received into Laboratory:	13-July-2009

Certified:

Division of  
**AMETEK**

This certificate is issued in accordance with the laboratory accreditation requirements of both the United Kingdom Accreditation Service and ISO.17025. It provides traceability of measurement to recognised national standards, and to units of measurement realised at the National Physical Laboratory or other recognised national standards laboratories. This certificate may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k=2, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.

## ANEXO E - Certificado de calibração Interferômetro Laser (página 2/2)

### CERTIFICATE OF CALIBRATION

UKAS ACCREDITED CALIBRATION LABORATORY 0026

15 July 2009

Serial Number: 47596

Page 2 of 2

This standard has been calibrated using computerised traceable measuring techniques on a Taylor Hobson Form Talysurf instrument. All measurements were taken using a 90° conisphere diamond tip stylus with a nominally 2µm spherical radius. A traversing speed of 0.5mm per second, an X-axis sampling rate of 0.25µm, Z-axis resolution of 3.2nm and software stylus tip/arcuate correction have been applied throughout the measurements.

The surface finish portion of the standard was calibrated in accordance with ISO 4287:2000 and ISO 4288:1998 utilising a 0.8mm Gaussian filter cut-off with a bandwidth ratio of 300:1. The mean Ra value was calculated from twenty measurements taken 0.8mm apart within the calibration rectangle, the results obtained, rounded to the nearest 0.01µm, are shown in Table 1.

The uncertainty of calibration for amplitude parameters is  $\pm(2\%+0.004\mu\text{m})$  of the mean value. When added to the standard deviation of the measurements, this gives a maximum uncertainty of calibration as stated in Tables 1 & 2.

Included in the tabulated results is a calculated imperial equivalent.

Table 1

Mean Ra Value	Standard Deviation	Maximum Uncertainty
6.11µm	0.017µm	±0.144µm
241µin	0.7µin	±5.7µin

The measured surface finish data was re-analysed using a 0.8mm 2CR filter cut-off with a bandwidth ratio of 100:1, the mean Ra result, rounded to the nearest 0.01µm, is shown in Table 2. This value should be used when calibrating instruments with filter options that do not conform to ISO 4288:1998.

Table 2

Mean Ra Value	Standard Deviation	Maximum Uncertainty
6.05µm	0.017µm	±0.142µm
238µin	0.7µin	±5.6µin

Upon receipt into the laboratory the standard was marked: 6.00µm  
236µin

Certified:



The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor k=2, providing a level of confidence of approximately 95%. The uncertainty evaluation has been carried out in accordance with UKAS requirements.

## ANEXO F - Certificado de calibração do Termo-higrômetro (página 1/2)

**elus** PRECISÃO METROLÓGICA  
INSTRUMENTAÇÃO

*Certificado de Calibração*  
*Laboratório de Temperatura & Umidade*

**Número da Certificação** R4996/13 **Folha 1/2**

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

**INSTRUMENTO :** Termohigrômetro Digital  
**FABRICANTE :** Instrutherm  
**MODELO :** HT-260  
**IDENTIFICAÇÃO :** Não especificado  
**NUMERO 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, segundo 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 CÉSAR SILVA

**Julio Cesar Pereira de Souza  
Gerente Técnico Substituto**

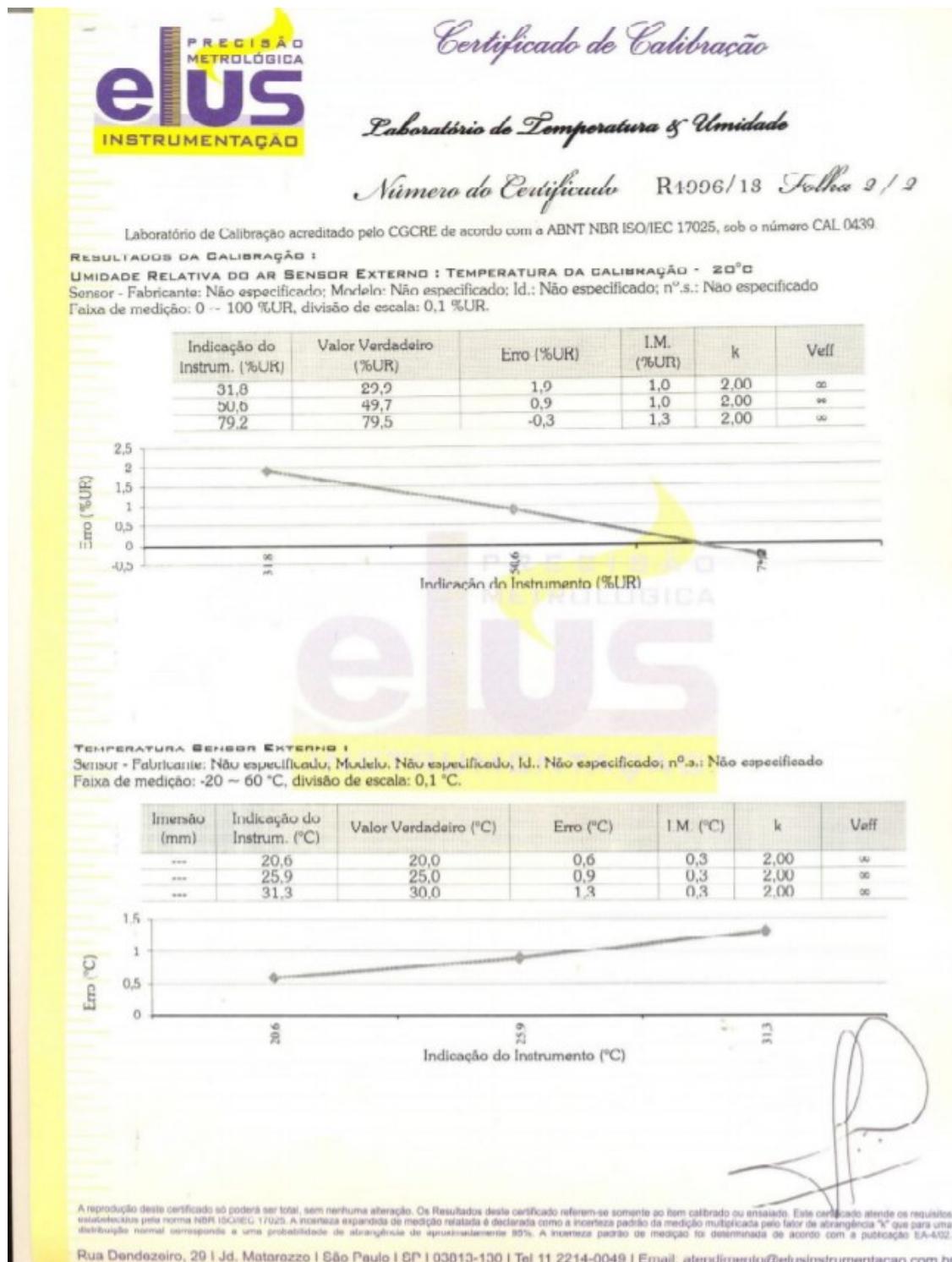
**RODRIGO BOMES CORDEIRO  
GERENTE TÉCNICO**

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-402.

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

## ANEXO F - Certificado de calibração do Termo-higrômetro

### (página 2/2)



## APÊNDICE I – Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova C(T)

Neste apêndice encontram-se os resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova C(T). Foram realizadas cinco leituras ( $L$ ) utilizando os Sistemas de Medição (SM): Paquímetro Digital (PD), Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) e Projetor de Perfil (PP). A incerteza de medição ( $U$ ) foi calculada para uma probabilidade de abrangência de 95 % e seu respectivo fator de abrangência ( $k$ ).

Tabela A1.1 - Dimensões do corpo de prova 1.

Cota	SM	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (mm)	U (mm)	k
$F_1$	MMC	12,972	12,958	12,945	12,944	12,953	12,954	0,099	1,99
$F_2$	MMC	12,960	12,990	12,972	12,944	12,958	12,965	0,100	1,98
$W$	MMC	50,533	50,571	50,510	50,504	50,520	50,528	0,187	1,98
$Dist.$	MMC	27,682	27,683	27,675	27,710	27,705	27,691	0,140	1,99
$a_e$	PP	25,915	25,908	25,896	25,892	25,985	25,901	0,012	2,57
$C_1$	PD	63,69	63,68	63,70	63,71	63,68	63,69	0,02	2,01
$C_2$	PD	60,92	60,98	60,97	60,91	60,93	60,94	0,04	2,31
$B$	PD	25,40	25,44	25,40	25,37	25,37	25,40	0,04	2,26

Tabela A1.2 - Dimensões do corpo de prova 2.

Cota	SM	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (mm)	U (mm)	k
$F_1$	MMC	12,977	12,969	12,982	12,975	12,979	12,976	0,099	1,99
$F_2$	MMC	12,990	12,981	12,961	12,978	12,975	12,977	0,099	1,99
$W$	MMC	50,590	50,532	50,519	50,525	50,524	50,538	0,187	1,98
$Dist.$	MMC	27,704	27,702	27,700	27,693	27,688	27,697	0,139	1,99
$a_e$	PP	26,332	26,324	26,332	26,321	26,336	26,329	0,008	2,36
$C_1$	PD	63,56	63,56	63,55	63,60	63,59	63,57	0,03	2,14
$C_2$	PD	60,88	60,86	60,91	60,90	60,90	60,89	0,03	2,12
$B$	PD	25,40	25,42	25,40	25,40	25,40	25,40	0,02	1,98

Tabela A1.3 - Dimensões do corpo de prova 3.

Cota	SM	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (mm)	U (mm)	k
$F_1$	MMC	12,631	12,659	12,653	12,654	12,640	12,647	0,098	1,99
$F_2$	MMC	12,632	12,660	12,650	12,647	12,643	12,646	0,098	1,99
$W$	MMC	51,063	51,069	51,069	51,060	51,075	51,067	0,187	1,99
$Dist.$	MMC	27,782	27,768	27,772	27,795	27,769	27,777	0,140	1,99
$a_e$	PP	22,228	22,226	22,240	22,230	22,233	22,231	0,007	2,31
$C_1$	PD	63,38	63,38	63,41	63,35	63,35	63,37	0,03	2,20
$C_2$	PD	61,00	61,00	61,00	60,99	61,00	61,00	0,02	1,96
$B$	PD	25,43	25,44	25,41	25,42	25,40	25,42	0,02	2,05

## APÊNDICE II - Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova SNTT

Neste apêndice encontram-se os resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova SNTT. Foram realizadas cinco leituras ( $L$ ) utilizando os Sistemas de Medição (SM): Micrômetro Digital (MD), Interferômetro Laser (IL) e Projetor de Perfil (PP). A incerteza de medição ( $U$ ) foi calculada para uma probabilidade de abrangência de 95 % e para cada mensurando foi calculado o fator de abrangência ( $k$ ).

Tabela A2.1 - Dimensões do corpo de prova do ensaio preliminar.

Cota	SM	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (mm)	U (mm)	k
$p$	PP	33,277	33,298	33,316	33,315	33,310	33,303	0,021	2,78
$D_{g1}$	PD	15,008	15,007	15,006	15,000	14,999	15,004	0,005	2,57
$D_{g2}$	PD	15,009	15,006	14,996	14,993	15,004	15,002	0,009	2,78
$D$	PD	12,008	11,973	11,978	11,974	11,986	11,984	0,018	2,78
$a_0$	IL	1,370	1,367	1,370	1,364	1,370	1,368	0,136	1,98

Tabela A2.2 - Dimensões do corpo de prova 1.

Cota	SM	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (mm)	U (mm)	k
$p$	PP	33,331	33,377	33,366	33,337	33,328	33,348	0,028	2,78
$D_{g1}$	PD	14,996	15,005	15,007	15,003	14,991	15,000	0,009	2,78
$D_{g2}$	PD	15,004	14,995	15,012	15,007	14,998	15,003	0,007	2,78
$D$	PD	12,009	12,003	12,005	12,018	12,019	12,011	0,009	2,78
$a_0$	IL	0,701	0,706	0,704	0,706	0,707	0,705	0,070	1,98

Tabela A2.3 - Dimensões do corpo de prova 2.

Cota	SM	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (mm)	U (mm)	k
$p$	PP	33,269	33,267	33,274	33,285	33,307	33,280	0,021	2,78
$D_{g1}$	PD	15,019	15,012	15,012	15,007	15,011	15,012	0,005	2,57
$D_{g2}$	PD	14,998	15,002	14,993	14,997	14,985	14,995	0,008	2,78
$D$	PD	12,018	12,017	12,011	12,012	12,015	12,015	0,004	2,36
$a_0$	IL	0,684	0,694	0,694	0,685	0,695	0,690	0,069	1,98

Tabela A2.4 - Dimensões do corpo de prova 3.

Cota	SM	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	Média (mm)	U (mm)	k
$p$	PP	33,341	33,313	33,289	33,326	33,335	33,321	0,026	2,78
$D_{g1}$	PD	15,010	15,024	15,025	15,024	15,022	15,021	0,008	2,78
$D_{g2}$	PD	15,013	15,008	15,015	15,010	15,009	15,011	0,004	2,36
$D$	PD	12,016	12,012	12,022	12,020	12,013	12,017	0,005	2,57
$a_0$	IL	0,714	0,718	0,700	0,719	0,719	0,714	0,071	1,98