

CLÁUDIO COSTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À
TENACIDADE À FRATURA OBTIDA VIA
INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2025

CLÁUDIO COSTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À TENACIDADE À
FRATURA OBTIDA VIA INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia

Coorientador: Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho

UBERLÂNDIA – MG

2025

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

S729 Souza, Cláudio Costa, 1988-
2025 Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura Obtida Via Indentação Instrumentada [recurso eletrônico] / Cláudio Costa Souza. - 2025.

Orientadora: Rosenda Valdés Arencibia.

Coorientador: Waldek Wladimir Bose Filho.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.606>

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.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 407, PPGEM				
Data:	08/10/2025	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:10
Matrícula:	12323EMC001				
Nome do Discente:	Cláudio Costa Souza				
Título do Trabalho:	Avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Tribologia e Materiais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Avaliação da tenacidade à fratura e da vida remanescente à fadiga através da técnica de indentação instrumentada				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva - UFU; Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior - UFU; Prof. Dr. Antonio Piratelli Filho - UNB; Prof. Dr. Marcelo Falcão de Oliveira - USP; Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho - USP (coorientador) e Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia - UFU; orientadora do candidato.

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

Aprovado.

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

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 **Rosenda Valdes Arencibia, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/10/2025, às 11:12, 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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/10/2025, às 11:13, 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 Falcão de Oliveira, Usuário Externo**, em 08/10/2025, às 11:13, 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 08/10/2025, às 11:16, 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 **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/10/2025, às 11:22, 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 **Antonio Piratelli Filho, Usuário Externo**, em 08/10/2025, às 11:24, 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, informando o código verificador **6647392** e o código CRC **C0BE867E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo seu amor incondicional e por me guiar por caminhos seguros rumo à evolução do espírito.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Petrobras por financiarem e possibilitarem a realização deste projeto de pesquisa.

À minha orientadora, prof^a. Rosenda Valdés Arencibia, que com muita dedicação me ampara e faz com que eu dê o meu melhor em cada projeto acadêmico desenvolvido. E foram muitos os projetos que nós concluímos juntos até este momento!

Ao meu coorientador, prof. Waldek Wladimir Bose Filho, pelo jeito solícito e gentil com que me ensina as teorias mais complexas relacionadas a esta tese.

À prof^a. Regina Paula Garcia, que acredita no meu potencial e me faz sentir ainda mais integrado à equipe do LTAD.

À minha mãe Maria do Rosário Costa, pelo seu amor por mim, demonstrado nos menores atos e nas mais variadas situações.

Ao meu filho Rafael Ishimine Costa, por me fazer querer viver mais intensamente cada momento.

Ao meu irmão Frederico Costa Souza, por ser um grande companheiro de jornada.

Ao meu pai Cláudio Vanderly de Souza, por ter me proporcionado o estudo que me fez chegar até aqui.

À minha avó Iracy Ramos Costa, que é pura luz para mim.

À minha tia Maria Beatriz R. Costa, pelo carinho e dedicação de sempre.

À minha madrinha Maria Abadia Costa, por estar presente em todas as etapas da minha vida.

Às minhas tias Maria Cristina R. Costa e Sônia Maria Costa, por terem cuidado de mim inúmeras vezes.

À minha prima Isabela Costa, por estar comigo nos momentos difíceis.

Ao meu amigo Rafael Novais de Miranda, por sempre se lembrar de mim e da minha família, mesmo quando a distância existe.

Aos colegas Luiz Fernando Maia de Almeida, Joyce Antunes da Silva e Saint Clair Alves Naves, por me ajudarem em etapas importantes deste projeto de pesquisa.

A todos os companheiros do LTAD, pela alegria que me transmitem.

A Nice de Fátima Silva, por ser uma referência para mim em tudo o que transcende a existência física.

SOUZA, C. C. **Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura Obtida via Indentação Instrumentada**. 2025. 265 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a incerteza associada à tenacidade à fratura do aço 4130 M obtida a partir de ensaios de indentação instrumentada. Três diferentes metodologias para a obtenção da tenacidade à fratura foram consideradas, a saber: Lee et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019) e Yu et al. (2023). Neste estudo, as incertezas foram calculadas pelo método do Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) e pelo método de Monte Carlo. Para a avaliação da incerteza, todos os mensurandos e variáveis de entrada foram identificados com base nas equações propostas por estes autores. Em seguida, a incerteza padrão associada a cada variável de entrada foi calculada aplicando o método GUM. Para quantificar as incertezas das variáveis cujas equações eram complexas, foi utilizado o método de Monte Carlo. As incertezas expandidas relativas à tenacidade à fratura foram de 4,94, 7,52 e 19,97 MPa·m^{0,5} considerando as metodologias de Lee et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019a) e Yu et al. (2023), respectivamente, para um nível de abrangência de 95,45 % e fator $k = 2,00$. Apesar da incerteza da metodologia de Yu et al. (2023) ter sido a maior dentre as três avaliadas, o valor da tenacidade à fratura para esta metodologia foi o mais próximo do valor de referência estimado por Melo (2019), com menos de 2 % de diferença. Já a metodologia de Lee et al. (2006) apresentou uma diferença no valor de tenacidade de aproximadamente 23 % em relação ao valor de referência. O teste estatístico de Mann-Whitney indicou que apenas a metodologia de Yu et al. (2023) fornece valores estatisticamente iguais aos obtidos por Melo (2019), para um nível de abrangência de 95 %.

Palavras-chave: Incerteza de Medição. Método GUM. Método de Monte Carlo. Tenacidade à Fratura. Indentação Instrumentada.

SOUZA, C. C. **Assessment of Uncertainty Associated with Fracture Toughness Obtained Via Instrumented Indentation**. 2025. 265 p. Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

This work aims to evaluate the uncertainty associated with the fracture toughness of 4130 M steel obtained from instrumented indentation tests. Three different methodologies for obtaining fracture toughness were considered: Lee et al. (2006), Zhang, Wang, and Wang (2019), and Yu et al. (2023). In this study, uncertainties were calculated using the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) method and the Monte Carlo method. For uncertainty assessment, all measurands and input variables were identified based on the equations proposed by these authors. Then, the standard uncertainty associated with each input variable was calculated using the GUM method. To quantify the uncertainties of variables with complex equations, the Monte Carlo method was used. The expanded uncertainties related to fracture toughness were 4.94, 7.52, and 19.97 MPa·m^{0.5} considering the methodologies of Lee et al. (2006), Zhang, Wang and Wang (2019a) and Yu et al. (2023), respectively, for a coverage level of 95.45 % and k factor = 2.00. Although the uncertainty of the Yu et al. (2023) methodology was the largest among the three evaluated, the fracture toughness value for this methodology was the closest to the reference value estimated by Melo (2019), with less than 2 % difference. The Lee et al. (2006) methodology presented a difference in the toughness value of approximately 23 % in relation to the reference value. The Mann-Whitney statistical test indicated that only the methodology of Yu et al. (2023) provides values statistically equal to those obtained by Melo (2019), for a coverage level of 95 %.

Keywords: Measurement Uncertainty. GUM Method. Monte Carlo Method. Fracture Toughness. Instrumented Indentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma do método de Monte Carlo. Fonte: Fernandes (2014)	11
Figura 2.2	Figura 2.2 – Curva de força aplicada em função da profundidade de indentação. Fonte: Amiri et al. (2014). Adaptado.	13
Figura 2.3	Alteração no módulo de elasticidade do material com dano em função da profundidade de indentação para quatro diferentes materiais. Fonte: Lee et al., (2006)	19
Figura 2.4	Energia do dano de deformação para um ciclo de indentação. Fonte: Zhang, Wang e Wang (2019)	21
Figura 2.5	Ajuste de reta no gráfico de U_D em função de A_{eq} . Fonte: Zhang, Wang e Wang, 2019.	23
Figura 3.1	Dispositivo de indentação <i>in situ</i> SSM-M1000 TM . Fonte: Silva (2023a).	30
Figura 3.2	Diagrama de Ishikawa contendo os parâmetros requeridos para a estimativa de K_{JC} de acordo com a metodologia de Lee et al. (2006). Fonte: Próprio autor.	38
Figura 3.3	Diagrama de Ishikawa contendo os parâmetros requeridos para a estimativa de J_{SIT} de acordo com a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019). Fonte: Próprio autor.	40
Figura 3.4	Diagrama de Ishikawa contendo os todos os parâmetros requeridos para a estimativa de K_{IC} de acordo com a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019). Fonte: Próprio autor.	40
Figura 3.5	Diagrama de Ishikawa contendo os parâmetros requeridos para a estimativa de $J_{IC,III}$ de acordo com a metodologia de Yu et al. (2023). Fonte: Próprio autor.	46
Figura 4.1	Imagem obtida durante a medição do raio do indentador com o Microscópio Eletrônico de Varredura. Fonte: Próprio autor.	50
Figura 4.2	Gráfico de $\ln(E_D)$ em função de $\ln(h_c^*)$. Fonte: Próprio autor.	51

Figura 4.3	Histogramas das variáveis h_c^* (a) e P_{mi} (b) do primeiro ensaio efetuado. Fonte: Próprio autor.	53
Figura 4.4	Histogramas dos valores simulados de $h_c^*.P_{mi}$ (a) e da variável K_{JC} (b) para o ensaio 1. Fonte: Próprio autor.	54
Figura 4.5	Valores de P_{maxi} , h_{maxi} , h_{pi} e S_i obtidos em cada ciclo dos ensaios 1, 2 e 3. Fonte: Próprio autor.	56
Figura 4.6	Valores de incerteza padrão associados a P_{maxi} e (a) e h_{maxi} (b) relativos aos 12 ciclos de indentação realizados no ensaio 1. Fonte: Próprio autor.	59
Figura 4.7	Valores de incerteza padrão associados a h_{pi} (a) and S_i (b) relativos aos 12 ciclos de indentação realizados no ensaio 1. Fonte: Próprio autor.	59
Figura 4.8	Histogramas dos valores simulados de U_{Di} , A_{eqi} , K_{IIC} e K_{IC} para o ensaio 1. Fonte: Próprio autor.	61
Figura 4.9	(a) Incertezas padrão relacionadas a U_{Di} e A_{eqi} e (b) relação entre as incertezas de U_{Di} e A_{eqi} . Fonte: Próprio autor.	62
Figura 4.10	Retas ajustadas por meio dos pontos obtidos (U_{Di} x A_{eqi}) no ensaio 1. Fonte: Próprio autor.	63
Figura 4.11	Histogramas das variáveis $J_{IC,IIT}$, $K_{J,IIT}$ e K_{IC} . Fonte: Próprio autor.	69
Figura 4.12	Tenacidade à fratura das três metodologias estudadas e os erros máximos representados pelas barras de erros. Fonte: Próprio autor.	72
Figura 4.13	Tenacidade à fratura das três metodologias estudadas e as incertezas expandidas representadas pelas barras de erros. Fonte: Próprio autor. ...	72
Figura 4.14	Desvio padrão da tenacidade à fratura K_{IC} considerando os trabalhos dos pesquisadores do LTAD. Fonte: Próprio autor.	74
Figura 4.15	Incerteza expandida da tenacidade à fratura K_{IC} dos trabalhos abordados nesta tese e do trabalho de Silva (2023). Fonte: Próprio autor.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Coeficientes das Eq. (2.19), (2.20) e (2.21) para o indentador de raio 0,25 mm. Fonte: Yu et al. (2023).	26
Tabela 2.2	Coeficientes das Eq. (2.19), (2.20) e (2.21) para o indentador de raio 0,5 mm. Fonte: Yu et al. (2023).	26
Tabela 3.1	Planejamento experimental para o fator metodologia. Fonte: Próprio autor.	47
Tabela 4.1	Valores do raio do indentador medido com MEV e da média e do desvio padrão dos dados coletados. Fonte: Próprio autor.	50
Tabela 4.2	Valores das variáveis e de suas incertezas padrão relativas ao ciclo 4 do ensaio 1 da metodologia de Lee et al. (2006). Fonte: Próprio autor. .	52
Tabela 4.3	Valores de K_{JC} referentes aos 3 ensaios realizados. Fonte: Próprio autor.	52
Tabela 4.4	Valores das incertezas padrão combinadas das variáveis h_c^* e P_{mi} considerando o ciclo 4 do primeiro ensaio realizado. Fonte: Próprio autor.	53
Tabela 4.5	Coeficientes de assimetria (<i>skewness</i>) e os coeficientes de achatamento (<i>kurtosis</i>) para as variáveis h_c^* e P_{mi} do ensaio 1. Fonte: Próprio autor. .	54
Tabela 4.6	Valores dos coeficientes de assimetria e de achatamento de h_c^* , P_{mi} e K_{JC} . Fonte: Próprio autor.	55
Tabela 4.7	Valores de J_{SIT} , K_{IIC} e K_{IC} obtidos para os 3 ensaios realizados. Fonte: Próprio autor.	57
Tabela 4.8	Principais informações relacionadas ao cálculo da incerteza associada a P_{maxi} para o ciclo 1 do primeiro ensaio de indentação. Fonte: Próprio autor.	58

Tabela 4.9	Principais informações relacionadas ao cálculo da incerteza associada a h_{maxi} para o ciclo 1 do primeiro ensaio de indentação. Fonte: Próprio autor.	58
Tabela 4.10	Dados relativos ao cálculo da incerteza padrão combinada de R_{ind} . Fonte: Próprio autor.	60
Tabela 4.11	Dados relativos ao cálculo da incerteza padrão combinada de E_0 . Fonte: Próprio autor.	60
Tabela 4.12	Incertezas padrão das variáveis v_{ind} , E_{ind} , v e α . Fonte: Próprio autor.	61
Tabela 4.13	Assimetria (<i>skewness</i>) e achatamento (<i>kurtosis</i>) dos valores simulados para a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a). Fonte: Próprio autor.	62
Tabela 4.14	Equações, coeficientes de correlação e coeficientes angulares das três retas ajustadas. Fonte: Próprio autor.	63
Tabela 4.15	Valores de K_{IIC} and K_{IC} com as respectivas incertezas padrão combinada e expandida considerando os 3 ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.	64
Tabela 4.16	Valores das variáveis calculadas relativos aos três ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.	65
Tabela 4.17	Valores de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} para os três ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.	65
Tabela 4.18	Incertezas padrão das variáveis relacionadas a η . Fonte: Próprio autor. .	66
Tabela 4.19	Valor de incerteza relacionado a η . Fonte: Próprio autor.	66
Tabela 4.20	Valores dos coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 e c_3 e suas incertezas padrão. Fonte: Próprio autor.	67
Tabela 4.21	Valores e incertezas padrão de β , n , η e E_0 para a estimativa da incerteza de P_m^{cr} . Fonte: Próprio autor.	67
Tabela 4.22	Valores de P_m^{cr} e h^{cr} com sus respectivas incertezas padrão. Fonte: Próprio autor.	67
Tabela 4.23	Valores e incertezas de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} para o primeiro ensaio efetuado. Fonte: Próprio autor.	68
Tabela 4.24	Valores de incertezas padrão combinada e expandida das variáveis $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} considerando os três ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.	68

Tabela 4.25	Valores dos coeficientes de assimetria (<i>skewness</i>) e de achatamento (<i>kurtosis</i>) de $J_{IC,III}$, $K_{IC,III}$ e K_{IC} . Fonte: Próprio autor.	69
Tabela 4.26	Tabela comparativa das metodologias de cálculo da tenacidade à fratura com suas respectivas incertezas expandidas e o percentual da incerteza em relação à tenacidade. Fonte: Próprio autor.....	70
Tabela 4.27	Erro máximo das metodologias estudadas. Fonte: Próprio autor.	71
Tabela 4.28	Tabela comparativa dos valores de tenacidade à fratura com desvio padrão e incerteza expandida, considerando trabalhos dos pesquisadores do LTAD. Fonte: Próprio autor.	74

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

a	Raio de contato considerando o pile-up/sink-in
A	Função adimensional
a^*	Raio devido ao <i>pile-up/sink-in</i>
$a_{1,2,3}$	Constantes
AB	Curva de descarregamento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A_c	Área de contato
a_{eff}	Raio de contato efetivo
A_{eqi}	Área equivalente da trinca no ciclo i
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
B	Função adimensional
$b_{1,2,3}$	Constantes
c	Constante de valor 0 para todos os aços carbono
C	Função adimensional
$c_{1,2,3}$	Constantes
CTOD	<i>Crack Tip Opening Displacement</i>
d	Diâmetro de impressão de dureza
D^*	Dano crítico
D_i	Dano no ciclo i
E	Módulo de elasticidade do material ensaiado
E_0	Módulo de elasticidade do material virgem
$\overline{E_0}$	Média dos valores do módulo de elasticidade do material ensaiado
E_D	Módulo de elasticidade do material com dano
E_D^*	Valor crítico do módulo de elasticidade do material com dano
E_{eff}	Módulo de elasticidade efetivo
E_{ind}	Módulo de elasticidade do material do indentador
E_R	Módulo de elasticidade reduzido

f	Fração de volume de vazios
f^*	Fração de volume de vazios crítica
FDP	Função Densidade de Probabilidade
F_{max}	Força máxima na curva de descarregamento do ensaio de indentação instrumentada
$\overline{F_{maxi}}$	Variabilidade das leituras de F_{maxi} no ciclo i
GUM	Guia para Expressão da Incerteza de Medição
h	Profundidade de indentação
h^*	Profundidade de indentação no ponto de início da fratura
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
h_c	Profundidade de contato considerando o efeito de <i>pile-up/sink-in</i>
h_c^*	Profundidade de contato desconsiderando o efeito de <i>pile-up/sink-in</i>
h_c^{cr}	Profundidade crítica de contato considerando o efeito de <i>pile-up/sink-in</i>
h_{maxi}	Profundidade máxima de indentação no ciclo i
$\overline{h_{maxi}}$	Média dos valores da profundidade máxima de indentação no ciclo i
h_p	Profundidade plástica
h_r	Profundidade de recarregamento
I_{Ins}	Incerteza relacionada à calibração do equipamento de ensaio de tração
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
$J_{Ic,IIC}$	Energia crítica de indentação
$J_{SIT Total}$	J_{SIT} considerando os três ensaios realizados
J_{SIT}	Taxa de liberação de energia
k	Fator de abrangência
K	Coefficiente de força
k_{cc}	Fator de abrangência igual a 2,00 relacionado à calibração da célula de carga para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %
K_{IC}	Tenacidade à fratura por deformação plana
K_{IIC}	Fator de intensidade de tensão crítica sob modo II

k_{Ins}	Fator de abrangência igual a 2,00 relacionado à calibração do equipamento de ensaio de tração para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %
K_{JC}	Tenacidade à fratura equivalente à Integral J
$K_{Jc,III}$	Fator de intensidade de tensão crítica no modo I
k_{LVDT}	Fator de abrangência igual a 2,00 relacionado à calibração do LVDT para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %
k_{MEV}	Fator de abrangência igual a 2,00 relacionado à calibração do MEV para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %
L	Força de indentação aplicada
$\bar{L}$	Média dos valores indicados pelo sistema de medição
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
M	Coeficiente de Meyer
Me	Mensurando
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
n	Expoente de endurecimento por deformação de materiais metálicos
num	Número de valores considerados na análise de incerteza
OAB	Curva de indentação obtida experimentalmente
P_m	Pressão de contato na indentação
P_m^{cr}	Pressão máxima de contato do indentador na ocorrência de energia máxima de deformação
P_{maxi}	Força máxima de indentação no ciclo i
$\overline{P_{maxi}}$	Média dos valores de força máxima de indentação no ciclo i
R	Relação entre as incertezas de U_{Di} e A_{eqi}
R_0	Raio de indentação residual
R_{ind}	Raio do indentador
$\overline{R_{ind}}$	Média dos valores do raio do indentador
R_{Ins}	Resolução do equipamento de ensaio de tração
R_{LVDT}	Resolução do LVDT
$r(x_i, x_j)$	Coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j
s	Desvio padrão
S	Rigidez de contato da curva de descarregamento
s^2	Variância

sE_0	Desvio padrão dos valores de módulo de elasticidade do material ensaiado
sF_{maxi}	Desvio padrão dos 15 maiores valores de força coletados no ensaio de indentação instrumentada no ciclo i
sh_{maxi}	Desvio padrão dos 15 maiores valores de profundidade de indentação coletados no ensaio de indentação instrumentada no ciclo i
S_{0i}	Curva teórica de descarregamento no ciclo i
u	Incerteza padrão
U	Incerteza expandida
u_c	Incerteza padrão combinada
$u(c)$	Incerteza padrão associada aos parâmetros $a_1, a_3, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$
U_{cc}	Incerteza relacionada à calibração da célula de carga para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %
$u_c(E_0)$	Incerteza padrão combinada associada ao módulo de elasticidade do material ensaiado
U_{CIns}	Incerteza da calibração do equipamento de ensaio de tração
$u_c(h_{maxi})$	Incerteza padrão combinada associada à profundidade máxima de indentação no ciclo i
$u_c(P_{maxi})$	Incerteza padrão combinada associada à força máxima de indentação no ciclo i
$u_c(R_{ind})$	Incerteza padrão combinada associada ao raio do indentador
U_{Di}	Energia de deformação do dano
$u(E_0)$	Incerteza padrão associada ao parâmetro E_0
$u(\overline{E_0})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro $\overline{E_0}$
$u(E_{ind})$	Incerteza padrão associada ao módulo de elasticidade do material do indentador
$u(\overline{F_{maxi}})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro $\overline{F_{maxi}}$
$u(h_c^{cr})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro h_c^{cr}
$u(\overline{h_{maxi}})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro $\overline{h_{maxi}}$
$u(h_{pi})$	Incerteza padrão associada à profundidade plástica no ciclo i
$u(J_{SIT})$	Incerteza padrão associada a J_{SIT} considerando o primeiro ensaio

	realizado apenas
$u(J_{SIT\ Total})$	Incerteza padrão associada a J_{SIT} considerando os três ensaios realizados
U_{LVDT}	Incerteza de calibração do LVDT
$u(n)$	Incerteza padrão associada ao parâmetro n
$u(R_{ind})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro R_{ind}
$u(\overline{R_{ind}})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro $\overline{R_{ind}}$
$u(S_i)$	Incerteza padrão associada ao parâmetro S_i
$u(Var_{J_{SIT}})$	Incerteza associada à variabilidade dos valores de J_{SIT} obtidos nos três ensaios realizados
$u(x)$	Incerteza-padrão da variável x
$u(x_i)$	Incerteza associada à fonte de erro representada pela estimativa x_i
$u^2(x_i)$	Variância associada a x_i , para todo i variando de 1 até N
$u(\alpha)$	Incerteza padrão associada ao parâmetro α
$u(\beta)$	Incerteza padrão associada ao parâmetro β
$u(\omega)$	Incerteza padrão associada ao parâmetro ω
$u(\Delta I_{cc})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro ΔU_{cc}
$u(\Delta I_{Ins})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro $\Delta U_{c_{Ins}}$
$u(\Delta I_{MEV})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro $\Delta U_{c_{MEV}}$
$u(\Delta I_{LVDT})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro ΔU_{LVDT}
$u(\Delta R_{cc})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro ΔR_{cc}
$u(\Delta R_{Ins})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro ΔR_{Ins}
$u(\Delta R_{LVDT})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro ΔR_{LVDT}
$u(\Delta R_{MEV})$	Incerteza padrão associada ao parâmetro ΔR_{MEV}
$u(\eta)$	Incerteza padrão associada ao parâmetro η
$u(v)$	Incerteza padrão associada ao coeficiente de Poisson do material ensaiado
$u(v_{ind})$	Incerteza padrão associada ao coeficiente de Poisson do material do indentedor
w_f	Energia por unidade de área requerida para criar uma superfície de trinca
$\bar{X}$	Média das leituras efetuadas em um sistema de medição

α	Razão entre a tensão máxima de cisalhamento e a tensão máxima normal
β	Constante de valor 1 para indentadores simétricos
β_m	Constante de valor 0,2285 para todos os aços carbono
ΔC	Correção associada à calibração do sistema de medição
ΔI_c	Contribuição da incerteza da calibração
$\Delta I_{c_{cc}}$	Contribuição da incerteza da calibração da célula de carga para o valor da incerteza de F_{maxi}
$\Delta I_{c_{Ins}}$	Correção associada à calibração do equipamento de ensaio de tração
$\Delta I_{c_{LVDT}}$	Correção associada à calibração do LVDT
$\Delta I_{c_{MEV}}$	Correção associada à calibração do MEV
ΔR	Correção associada à resolução do sistema de medição
ΔR_{CC}	Correção associada à resolução da célula de carga
ΔR_{Ins}	Correção associada à resolução do equipamento de ensaio de tração
ΔR_{LVDT}	Correção associada à resolução do LVDT
ΔR_{MEV}	Correção associada à resolução do MEV
ε_{IT}	Deformação representativa
ξ	Constante de valor 0,14
η	Parâmetro do material, eu pode ser obtido a partir de uma análise de regressão de $F_{max}/4a^2$ e a/R
σ	Tensão constitutiva
σ_f	Tensão de tração remota na fratura
σ_{IT}	Tensão representativa
ν	Coefficiente de Poisson do material ensaiado
ν_{eff}	Graus de liberdade efetivos
ν_i	Graus de liberdade da variável x_i
Ψ	Fator de restrição plástica igual a 3,0
ω	Constante de valor 0,75 para indentadores esféricos

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução	1
1.1. Objetivo Principal	3
1.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Justificativa	3
1.4. Contribuição Técnico-Científica do Trabalho	5
1.5. Estrutura da Tese	5
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica	7
2.1. Incerteza de Medição. Método GUM	7
2.2. Incerteza de Medição. Método de Monte Carlo	10
2.3. Tenacidade à Fratura	11
2.3.1. Metodologia de Lee et al. (2006)	17
2.4.2. Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a)	20
2.5.3. Metodologia de Yu et al. (2023)	23
CAPÍTULO III – Metodologia	28
3.1. Resumo das propriedades do material e do ensaio realizado	29
3.2. Metodologia de Lee et al. (2006)	30
3.2.1. Cálculo da incerteza associada a profundidade de indentação sem considerar o efeito pile-up/sink-in (h_c^*)	32
3.2.2. Cálculo da incerteza associada a P_{mi}	35
3.2.3. Cálculo da incerteza de $P_{mi} \cdot h^*$	36
3.2.4. Cálculo da incerteza de K_{JC}	36
3.3. Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a)	38
3.3.1. Cálculo das incertezas padrão associadas a P_{maxi} , h_{maxi} , S_i , R_{ind} e E_0	41
3.3.2. Cálculo da incerteza associada a h_{pi}	41
3.3.3. Cálculo da incerteza associada a α	41

3.3.4. Cálculo da incerteza associada a J_{SIT} , K_{IIC} e K_{IC}	42
3.4. Metodologia de Yu et al. (2023)	42
3.4.1. Cálculo da incerteza associada a η	42
3.4.2. Cálculo da incerteza associada a P_m^{cr}	44
3.4.3. Cálculo da incerteza associada a h_c^{cr}	45
3.4.4. Cálculo da incerteza associada a $J_{IC,IIT}$, $K_{JC,IIT}$ e K_{IC}	45
3.5. Comparação Metrológica e Estatística dos Valores de Tenacidade à Fratura Obtidos pelas Metodologias Avaliadas	46
3.6. Programação em MATLAB	47
CAPÍTULO IV – Resultados e Discussões	49
4.1 Resultados da Medição do Raio do Indentador	49
4.2. Resultados da Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura para a Metodologia de Lee et al. (2006)	51
4.2.1. Valores das variáveis e das incertezas padrão	51
4.2.2. Valores das incertezas padrão combinadas e da incerteza expandida da tenacidade à fratura	53
4.3. Resultados da Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura para a Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a)	55
4.3.1 Valores das variáveis	55
4.3.2. Resultados dos cálculos de incerteza	57
4.4. Resultados da Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura para a Metodologia de Yu et al. (2023)	64
4.4.1 Valores das variáveis	64
4.4.2. Incertezas das variáveis envolvidas no cálculo de tenacidade à fratura ...	65
4.5. Comparação entre as Metodologias de Cálculo de Tenacidade à Fratura	70
CAPÍTULO V – Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
APÊNDICES	
Apêndice I – Valores dos parâmetros para o cálculo da tenacidade à fratura	86

Apêndice II – Etapas para o cálculo da tenacidade à fratura pelas diferentes metodologias	104
Apêndice III – Código em MATLAB para o cálculo da incerteza da tenacidade à fratura obtida pela metodologia de Lee et al. (2006)	111
Apêndice IV – Código em MATLAB para o cálculo da incerteza da tenacidade à fratura obtida pela metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a)	166
Apêndice V – Código em MATLAB para o cálculo da incerteza da tenacidade à fratura obtida pela metodologia de Yu et al. (2023)	229
 ANEXOS	
Anexo I – Caracterização do material ensaiado (ALMEIDA et al. 2022)	240

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A tenacidade à fratura é uma importante propriedade na avaliação da integridade estrutural, sendo definida como a resistência de um material à propagação de trincas (JEON et al., 2017). A integral J é um método normatizado para a estimativa de tenacidade à fratura (ASTM, 2018). No entanto, este método é complexo, destrutivo e inviável em algumas situações, além de exigir a utilização de corpos de prova projetados especificamente para este fim e que geralmente necessitam de certo volume de material, muitas vezes indisponível.

Em muitas situações existe a necessidade da aplicação de métodos indiretos para determinação das propriedades mecânicas, incluindo a tenacidade à fratura, que possam ser aplicados em laboratório em pequenas amostras ou ainda *in situ* diretamente no componente desde que não sejam destrutivos. O método da indentação instrumentada possui essas características e vem sendo utilizado por pesquisadores para estimar a tenacidade à fratura dos materiais a partir de diferentes metodologias de cálculo. Uma aplicação comum da indentação instrumentada ocorre na indústria de óleo e gás.

A indentação instrumentada é uma técnica alternativa atraente em relação aos métodos de ensaios destrutivos convencionais (YU et al., 2018) tendo como principais vantagens a simplicidade experimental e a acessibilidade à avaliação de diversos materiais (CHEN, 2012). Na indentação instrumentada, a força de penetração do indentador é monitorada e correlacionada com a profundidade de indentação durante o carregamento e o descarregamento (HE et al., 2011). Ela tem apresentado bons resultados na determinação da tenacidade de metais dúcteis e cerâmicas frágeis (LI et al., 2015). Este tipo de ensaio pode ser aplicado em regiões de pequeno volume e estruturas em serviço devido a sua natureza localizada e não destrutiva,

não removendo nenhum material da superfície avaliada (MURTY et al., 1998; JEON et al., 2017).

Mais recentemente, vários pesquisadores têm se dedicado à determinação da tenacidade à fratura de metais dúcteis, onde o processo de falha acontece pela propagação estável de trincas. Na literatura estudada, três metodologias distintas se destacam para o cálculo da tenacidade à fratura via indentação instrumentada, a saber: Lee et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019a) e Yu et al., (2023). Lee et al. (2006) propuseram uma metodologia para estimar a tenacidade à fratura de materiais dúcteis baseada na energia crítica de indentação, sendo aplicada pela primeira vez a mecânica do dano contínuo para determinação da profundidade crítica de indentação e que caracteriza o início de propagação estável de uma trinca. Zhang, Wang e Wang (2019a) propuseram um modelo baseado na taxa de liberação de energia para calcular a tenacidade à fratura. Por fim, Yu et al. (2023) determinaram a tenacidade à fratura de materiais metálicos que possuem o encruamento descrito por uma função de lei de potência, sendo apresentada uma nova função adimensional, derivada por análise dimensional e com o cálculo de elementos finitos.

Entretanto, nenhuma das metodologias citadas anteriormente é normatizada, provavelmente pelo fato de não fornecerem diretamente o valor de tenacidade. Para que elas sejam contempladas por normas técnicas é fundamental validar os resultados obtidos por meio de indentação instrumentada. O cálculo da incerteza de medição se torna essencial para avaliar a qualidade dos valores de tenacidade decorrentes dos ensaios de indentação instrumentada. No entanto, a complexidade das equações para a obtenção dos parâmetros de interesse nos ensaios torna difícil o trabalho dos pesquisadores e demais profissionais que precisam emitir os resultados com confiabilidade e rastreabilidade metrológica.

De acordo com Graba (2021) os trabalhos científicos que tratam da determinação de grandezas físicas como características de materiais de forma geral não quantificam a incerteza associada. Este fato é justificado pelo seguinte: a avaliação da incerteza é baseada em cálculos complexos que são demorados e trabalhosos, além de existir a falta de cultura metrológica e a dificuldade de entendimento e aplicação do Guia para Expressão da Incerteza de Medição – GUM (BIPM, 2008a).

1.1. Objetivo Principal

O objetivo principal desta tese foi avaliar a incerteza associada à medição indireta da tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada considerando três metodologias distintas que constam na literatura: Lee et al. (2006); Zhang, Wang e Wang (2019a); e Yu et al., (2023).

1.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver, validar e documentar três metodologias para cálculo da incerteza de medição associada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada. Uma metodologia de cálculo de incerteza para cada metodologia de ensaio;
- Identificar os fatores que contribuem para a incerteza associada à tenacidade à fratura;
- Comparar os valores de incerteza associada à tenacidade à fratura obtidos via indentação instrumentada, visando a avaliar a qualidade dos resultados e a validar estas metodologias;
- Desenvolver três códigos em MATLAB para cálculo da incerteza de medição associada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada com o intuito de popularizar esta tarefa;
- Contribuir para a rastreabilidade metrológica dos valores de tenacidade à fratura, visando ao atendimento da NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017).

1.3. Justificativa

Uma boa prática em qualquer medição de propriedades mecânicas de materiais de engenharia é avaliar e relatar as incertezas associadas. Uma declaração de incerteza pode ser exigida por um cliente que deseja saber os limites dentro dos quais o resultado relatado pode ser apresentado. Além disso, o próprio laboratório de ensaio pode desejar ter um melhor entendimento de quais aspectos específicos do procedimento de ensaio e sistema de medição têm maior efeito nos resultados (GABAUER, 2000) para que estratégias possam ser adotadas e esses efeitos eliminados ou reduzidos.

Como já foi mencionado, a tenacidade à fratura é uma propriedade mecânica utilizada para avaliar a capacidade que o material possui de resistir à propagação de uma trinca. Para que decisões de engenharia sejam tomadas é necessário que os resultados de medição sejam confiáveis. A garantia da confiabilidade metrológica de um resultado de medição requer a garantia da rastreabilidade metrológica estabelecida na NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017).

Seja qual for o ensaio utilizado para determinação da tenacidade à fratura, a avaliação da incerteza associada é complexa devido principalmente ao número significativo de grandezas físicas envolvidas no cálculo. Cada um dos mensurandos é determinado de forma diferente, utilizando modelos matemáticos distintos. Adicionalmente, alguns desses modelos matemáticos são de média ou elevada complexidade impossibilitando a aplicação do método do Guia para Expressão da Incerteza de medição – GUM (INMETRO, 2012a). Isso torna o cálculo de incerteza associada à tenacidade à fratura um desafio (KOEPEKE et al., 2023). Além disso, os autores destacam a dificuldade de cálculo da incerteza utilizando as técnicas tradicionais de propagação de erro.

Não foram encontrados trabalhos sobre avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada, justificando assim a atual proposta. A declaração da incerteza é um requisito da NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2017).

Koepke et al. (2023) aplicaram o método de Monte Carlo para calcular a incerteza padrão associada a parâmetros utilizados nas equações para cálculo da tenacidade à fratura via ensaios *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD-R) e Integral J. Mesmo assim, o trabalho de Koepke et al. (2023) não declara a incerteza final associada à tenacidade à fratura.

Silva (2023b) propôs uma metodologia de cálculo da incerteza relacionada à tenacidade à fratura pelo método da Integral J. Os resultados obtidos mostraram que a incerteza expandida associada à tenacidade à fratura, considerando três corpos de prova fabricados em aço AISI 4340 (28 HRC), é 12,91 kJ/mm² representando 8,5 % do valor médio de J (152,18 J/mm²) com probabilidade de abrangência de 95,45 %. Foi constatado também que o cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura é um grande desafio considerando que foi necessário avaliar 19 mensurandos para obter o valor de J .

Rodrigues (2020) estimou a incerteza associada à tenacidade à fratura do aço AISI 4340 temperado e revenido com dureza de 45 HRC combinando os métodos GUM e Monte Carlo. A média da tenacidade à fratura obtida foi de 102,2 MPa·m^{0,5}, com uma incerteza expandida de 1,8 MPa·m^{0,5}, o que demonstra que a incerteza representa menos de 2 % do valor final da tenacidade.

Os trabalhos de Lee et al. (2006); Zhang, Wang e Wang, (2019a) e Yu et al., (2023) contém metodologias de cálculo da tenacidade à fratura via indentação instrumentada. Foi a partir das equações apresentadas nestes artigos que a modelagem matemática para o cálculo da incerteza desta tese foi formulada.

1.4. Contribuição Técnico-Científica do Trabalho

Os resultados obtidos neste trabalho ampliam o estado atual de conhecimento para o cálculo de incerteza associada à tenacidade à fratura de materiais obtidos via indentação instrumentada:

- Tem-se três metodologias documentadas e validadas para o cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada. Resultados parciais relacionados a este tópico foram publicados na revista *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* (SOUZA et al., 2025). Outros dois artigos estão em fase final da correção. Um deles será enviado para a revista *Measurement*.
- A quantificação e declaração da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada utilizando as três metodologias citadas possibilitará avaliar a qualidade dos valores de tenacidade obtidos em cada caso, bem como contribuir para a rastreabilidade metrológica destes resultados.
- Tem-se a comparação dos valores de incerteza associada à tenacidade à fratura obtidos via indentação instrumentada pelas metodologias de Lee et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019a) e Yu et al. (2023).
- Tem-se três algoritmos desenvolvidos em MATLAB para o cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada. Estes três programas serão registrados junto à agência intelecto;

1.5. Estrutura de Tese

Os outros quatro capítulos que compõem esta tese contemplam o seguinte:

O Capítulo II contém a revisão bibliográfica, que explora a teoria relacionada aos temas incerteza de medição e tenacidade à fratura, com ênfase na técnica da indentação instrumentada. Além disso, são abordados neste capítulo de forma detalhada os cálculos referentes às metodologias para estimativa da tenacidade à fratura de Le et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019a) e Yu et al. (2023).

No Capítulo III é abordada a metodologia aplicada para o desenvolvimento do presente trabalho científico.

O Capítulo IV contém os resultados obtidos após a realização dos cálculos e análises, bem como a discussão a respeito das informações e dados obtidos.

O capítulo V apresenta as conclusões da tese e as propostas para trabalhos futuros.

Ainda, as referências bibliográficas, os Apêndices de I a V e o Anexo I constam no final desta tese.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos relacionados aos temas: incerteza de medição considerando os métodos do Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) e de Monte Carlo e tenacidade à fratura. Além disso, são detalhadas as metodologias de cálculo da tenacidade à fratura de acordo com Lee et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019a) e Yu et al. (2023), que consistem no foco principal deste trabalho.

2.1. Incerteza de Medição. Método GUM

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012a), incerteza de medição consiste no parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos a um mensurando. Ela é um indicativo da qualidade da medição efetuada.

É possível calcular a incerteza de uma medição por diferentes métodos. Contudo, o mais conhecido e aplicado deles é aquele apresentado pelo Guia para Expressão da Incerteza de Medição – GUM (INMETRO, 2012b). Este é um documento originalmente publicado pela *International Organization for Standardization* (ISO).

Para estimar a incerteza conforme o GUM, é necessário definir um modelo matemático que engloba todas as variáveis conhecidas que exercem influência sobre a grandeza medida. Desta forma, relaciona-se as grandezas estabelecidas e, então, obtém-se um valor de incerteza final. Cada variável de influência na medição tem sua incerteza padrão $u(x)$ obtida com base

em dois tipos de avaliação (Tipo A e Tipo B). É válido mencionar que a incerteza padrão é aquela que representa a incerteza individual de uma variável específica.

A avaliação do Tipo A de uma variável de influência é efetuada quando existem dados suficientes para realizar uma análise estatística, ou seja, é possível estimar a média e a variância ou desvio padrão de uma amostra de valores. A Equação (2.1) expressa a forma de cálculo da incerteza do tipo A.

$$u(x) = \sqrt{\frac{s^2}{num}} \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1), s é o desvio padrão da amostra de valores coletados da variável x e num é o tamanho amostral. As distribuições de probabilidade normalmente atreladas aos dados de uma avaliação do Tipo A são a normal ou a *t-Student*.

Já a avaliação do Tipo B é empregada nos casos em que as informações disponíveis sobre a variável de influência são insuficientes para efetuar uma análise estatística. Geralmente, as informações acerca destas variáveis de influência são obtidas em certificados de calibração, catálogos de fabricantes ou manuais técnicos. As distribuições de probabilidade comumente aplicadas nestes casos são a retangular, a triangular e a trapezoidal, sendo as distribuições retangular e triangular as mais utilizadas. As Equações (2.2) e (2.3) representam a forma de cálculo das incertezas padrão com distribuição de probabilidade retangular e triangular, respectivamente.

$$u(x) = \frac{\text{estimativa}}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

$$u(x) = \frac{\text{estimativa}}{\sqrt{6}} \quad (2.3)$$

Após o cálculo das incertezas-padrão relativas às variáveis de influência, é preciso combiná-las com o objetivo de determinar a incerteza padrão combinada da variável de saída. A incerteza-padrão combinada é calculada aplicando-se a lei de propagação de incertezas no modelo matemático da medição conforme mostra a Eq. (2.4).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.4)$$

Na Equação (2.4), y é a estimativa da variável resposta Y ; x_i é a estimativa da variável X_i ; $u^2(x_i)$ é a variância associada a x_i , para todo i variando de 1 até N ; N é o número de variáveis que afetam a variável pela estimativa x_i ; $u(x_i)$ é a incerteza associada à fonte de erro representada pela estimativa x_i ; e $r(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j . Além disso, $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$ consiste na derivada parcial da equação proposta em função da variável x_i .

A equação da incerteza padrão combinada é bastante simplificada caso o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e y_i seja nulo. Nestes casos, não existe correlação entre duas variáveis. Desta forma, pode-se expressar a Eq. (2.4) conforme a Eq. (2.5).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.5)$$

Embora a incerteza-padrão combinada englobe a contribuição de todas as variáveis de entrada ou fatores de influência, sua probabilidade de abrangência é de 68,27 %. Portanto, é preciso elevar esse percentual para que a maioria dos valores situados ao redor da média aritmética seja considerada. Uma probabilidade de abrangência de 95 % ou 95,45 % é mais adequada para a maior parte das aplicações da engenharia mecânica. Desta forma, a incerteza expandida (U) deve ser calculada como o produto da incerteza-padrão combinada e do fator k correspondente, conforme a Eq. (2.6).

$$U = k \cdot u_c \quad (2.6)$$

Com a probabilidade de abrangência requerida e os graus de liberdade efetivos da medição, a tabela de distribuição *t-Student* deve ser consultada para estabelecer o fator de abrangência k da medição em questão, que será utilizado para multiplicar a incerteza-padrão combinada. Os graus de liberdade efetivos (v_{eff}) são determinados por meio da equação de Welch-Satterthwaite, na qual v_i representa os graus de liberdade da variável x_i , conforme a Eq. (2.7).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (2.7)$$

Com estas informações, é possível declarar o valor da medição, que é dado pelo valor da média aritmética das leituras efetuadas seguido de mais ou menos o valor da incerteza expandida para um nível de abrangência de 95 % ou 95,45 %.

2.2. Incerteza de Medição. Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo proposto no JCGM 101 (BIPM et al., 2008) para a determinação da incerteza de medição apresenta-se como uma alternativa para o método GUM, uma vez que este último exige que o modelo matemático para o cálculo da incerteza padrão combinada seja linear e que as derivadas parciais, que representam os coeficientes de sensibilidade, sejam calculadas analiticamente.

Também para o método de Monte Carlo, deve-se estimar as incertezas padrão das variáveis de influência. O processo de obtenção destas incertezas é idêntico ao do método GUM, considerando-se os tipos de avaliação como A (quando se tem dados suficientes para realizar uma análise estatística) ou B (quando a quantidade de dados disponíveis não possibilita realizar análises estatísticas).

A diferença entre ambos os métodos consiste na combinação das incertezas padrão. No método GUM, aplica-se a equação característica da “lei de propagação de incerteza”, enquanto no método de Monte Carlo, os valores simulados das variáveis de entrada são propagados utilizando o modelo matemático da medição. Vale destacar que o método de Monte Carlo utiliza as Funções Densidade de Probabilidade (FDP) das distribuições de entrada fornecendo informações mais completas sobre as variáveis (LANDGRAF; STEMPNIAK, 2004). Desta forma, aplica-se perturbações no valor da média ou valor central de cada variável de influência de modo a refletir o comportamento das funções densidade de probabilidade.

O JCGM 101 (BIPM et al., 2008) recomenda que sejam realizadas 1 000 000 de iterações com o intuito de se obter uma amostra que represente realmente a população dos valores de interesse.

Se os valores do mensurando obtidos via método de Monte Carlo forem normalmente distribuídos, então a incerteza padrão combinada é igual ao desvio padrão populacional. Para

obter a incerteza expandida, com uma abrangência de 95,45 %, basta multiplicar a incerteza combinada pelo fator de abrangência 2,00.

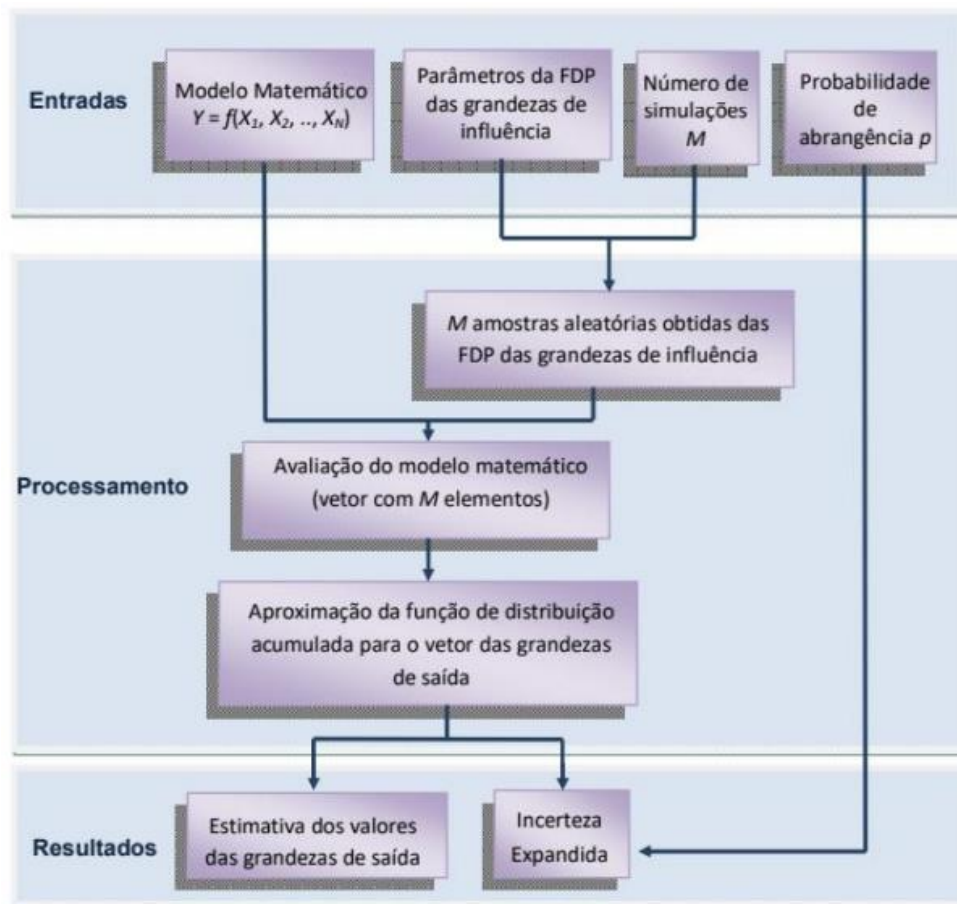


Figura 2.1 – Fluxograma do método de Monte Carlo. Fonte: Fernandes (2014).

2.3. Tenacidade à Fratura

De acordo com Jeon et. al (2017), tenacidade à fratura é definida como a resistência do material à propagação de trincas. Dentre os parâmetros definidos para avaliar a tenacidade à fratura do material estão: o fator de intensidade de tensão (K); a integral J e o deslocamento de abertura da ponta da trinca (*Crack Tip Opening Displacement* - CTOD).

O CTOD é a distância relativa entre as duas superfícies na ponta da trinca, quando ela ocorre sob carregamento. Já a Integral J é baseada em conceitos físicos e se fundamenta em equações de balanço de energia (RODRIGUES, 2020). Esta técnica pode ser entendida como um balanço energético que objetiva generalizar a taxa de liberação de energia potencial na trinca

em relação à variação do seu comprimento. A Integral J possibilita caracterizar a fratura em materiais não lineares (SILVA, 2023b).

O método de indentação instrumentada para estimar a tenacidade à fratura, pode ser usado para minimizar as desvantagens dos métodos convencionais de teste de resistência à fratura, pois são mais simples, rápidos, não destrutivos em alguns casos e podem ser realizados *in situ* (HAGGAG et al, 1990; LEE et al., 2006). Estes ensaios requerem apenas uma área mínima do material, eliminando o uso de máquinas pesadas, geometrias de amostras ou corpos de prova complexas e procedimentos experimentais de difícil execução (HE et al., 2011).

Até o trabalho de Haggag et al. (1990), a estimativa da tenacidade à fratura usando o ensaio de indentação instrumentada não era constantemente abordado para metais dúcteis, uma vez que a indentação nestes materiais produz uma zona de deformação plástica muito maior em relação aos materiais frágeis, e a deformação plástica ao redor da área de contato do indentador introduz um acúmulo de danos por microdefeitos (BYUN et al., 2000; LI et al., 2012). Para superar esse desafio foram propostos estudos com base na energia de deformação (LI et al., 2012) e a utilização da mecânica do dano contínuo para determinar o ponto de início característico da fratura. Esses trabalhos fizeram com que novas metodologias de cálculo surgissem para estimar a tenacidade à fratura por indentação instrumentada para os materiais dúcteis (HE et al., 2011).

A indentação instrumentada é caracterizada por ter dois sensores que coletam força e deslocamento do indentador. Efetua-se o monitoramento contínuo da força de penetração do indentador em função da profundidade h de penetração em um corpo de prova durante o carregamento e o descarregamento (HE et al., 2011). Uma curva típica de indentação durante um único ciclo de carga e descarga é mostrada na Fig. 2.2, no qual S é a rigidez de contato da curva de descarregamento e h_p e h_m são, respectivamente, a profundidade plástica e profundidade máxima de indentação (AMIRI et al., 2014).

Com relação ao carregamento e ao descarregamento, tem-se no ensaio de indentação instrumentada vários ciclos. A aplicação da força é progressiva à medida em que estes avançam. Como a força é ampliada, também a profundidade de indentação se torna maior.

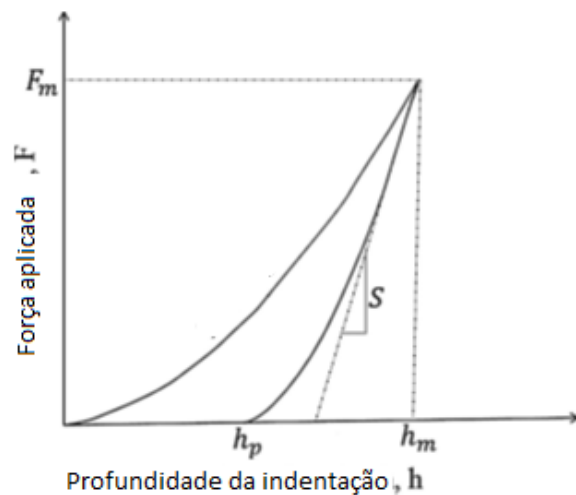


Figura 2.2 – Curva de força aplicada em função da profundidade de indentação. Fonte: Amiri et al. (2014). Adaptado.

De acordo com Koepke, Weeks e Splett (2023), determinar a tenacidade à fratura e as curvas de resistência à fratura de materiais metálicos é um processo complicado. Várias metodologias foram propostas para descrever o procedimento de ensaio e os cálculos associados. No entanto, nenhuma destas metodologias fornece orientação para estimar a incerteza dos resultados da medição. Devido à natureza complexa do procedimento de ensaio e dos cálculos, as técnicas tradicionais envolvendo a lei de propagação de incertezas encontradas no GUM não são viáveis de serem aplicadas. O objetivo do trabalho é demonstrar que a incerteza da profundidade inicial prevista da trinca e os parâmetros de ajuste das curvas de resistência integral J ou CTOD podem ser obtidos aplicando o método de Monte Carlo. As simulações de Monte Carlo se mostraram úteis quando o equacionamento para obtenção do mensurando é muito complexo.

Paruchuru et al. (2017) efetuaram um estudo com o intuito de avaliar a incerteza nos seguintes ensaios e métodos: ensaio compacto de tensão e ensaio compacto sanduíche; métodos usados para avaliar a tenacidade à fratura, em termos do fator de intensidade de tensão e da taxa de liberação de energia. Os autores também determinaram a contribuição de cada fonte de incerteza nos ensaios e métodos mencionados.

Para Ahn e Kwon (2001), a técnica de indentação esférica tem o potencial de ser um excelente substituto para o ensaio de tração convencional, especialmente quando os corpos de prova são pequenos ou no caso de soldas. O artigo descreve a derivação da relação da tensão verdadeira e da deformação verdadeira a partir das curvas de profundidade e força de indentação

medidas pela técnica de indentação com indentador esférico. As propriedades de vários aços foram avaliadas por meio das curvas de profundidade e força de indentação. Esta técnica provou ser uma excelente substituta para o ensaio de tração padrão. A indentação esférica instrumentada tem o potencial de ser aplicada de forma não destrutiva para avaliar propriedades mecânicas de volumes pequenos como soldas e zonas termicamente afetadas.

Ensaio de indentação instrumentada foram realizados na liga de alumínio Al6061-T6 para estimar a tenacidade à fratura. Foram utilizados modelos de energia atrelados à abordagem da mecânica do dano contínuo. Os resultados são comparados com os dados obtidos pelo ensaio de compacto de tração padrão (AHN e KWON, 2001).

Dentre os diferentes tipos de falhas, como flambagem e deformação plástica excessiva, a falha por fratura é um dos danos estruturais desafiadores, a ser considerado no projeto e avaliação de componentes mecânicos em aplicações industriais. Existem alguns métodos de medição padrão que podem ser seguidos para determinar a tenacidade à fratura, como a ASTM E1820 (ASTM, 2018). Os métodos propostos nessas normas técnicas são bastante complexos e demorados em termos de projeto de fixação, processo de pré-fabricação dos corpos de prova, dentre outros. Eles têm limitações severas em termos de requisitos dimensionais que podem praticamente causar dificuldades para componentes muito pequenos. Assim, encontrar um método alternativo para medir a tenacidade à fratura de forma não destrutiva é muito útil, especialmente em aplicações industriais, onde a tenacidade à fratura pode ser medida em componentes já instalados (AHN e KWON, 2001).

Haggag et al. (1990) desenvolveram e patentearam um equipamento de indentação de campo para avaliar, de forma não destrutiva e *in situ*, a integridade de estruturas metálicas. Seu estudo investigou a aplicabilidade do uso de um novo ensaio automatizado de indentação esférica para medir as propriedades de fluxo de materiais metálicos, incluindo aqueles que exibem deformações Lüders ou não homogêneos (aços carbono, ligas de titânio, ligas de alumínio, dentre outros) e estimar sua tenacidade à fratura. O ensaio proposto é baseado em múltiplas indentações (no mesmo local de penetração) de uma superfície metálica polida por um penetrador esférico. A automação do ensaio, onde um computador e um controlador foram usados de maneiras inovadoras para controle, bem como para analisar os dados do ensaio, tornou-o simples, rápido, preciso, econômico e reprodutível. Os resultados dos ensaios em diferentes metais, soldas e materiais são apresentados e discutidos no artigo. Excelente concordância foi obtida entre os dados derivados do *Automated Ball Indentation* (ABI) e aqueles dos ensaios-padrão ASTM de tração uniaxial e resistência à fratura.

A determinação da integridade de qualquer estrutura metálica é necessária para garantir que não ocorrerão falhas durante a vida útil dos componentes ou para avaliar a extensão da vida útil da estrutura. Para avaliar a integridade das estruturas após acidentes ou condições severas de serviço, é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas do material, do tamanho e extensão dos defeitos induzidos, e da espessura atual e das tensões residuais (HAGGAG et al., 1990).

A integridade das estruturas depende do comportamento de fratura dos materiais e, em geral, as características de fratura dos materiais estruturais são avaliadas por meio de ensaios destrutivos, como Charpy, tenacidade à fratura e outras técnicas semelhantes. No entanto, para avaliar a condição do material em serviço, muitas vezes não é viável ou prático retirar amostras de estruturas operacionais. Técnicas não destrutivas podem também ser utilizadas para determinar as propriedades mecânicas. Embora muitas técnicas, como resistência magnética, ruído de Berkhausen e dureza tenham sido utilizadas para correlacionar as respectivas propriedades com a energia de fratura medida a partir de ensaios Charpy ou de tenacidade à fratura. Essas metodologias são essencialmente empíricas, sem nenhuma justificativa técnica real subjacente. Avanços recentes usando a técnica de indentação esférica demonstraram claramente a viabilidade de se obter, com excelente precisão, os verdadeiros comportamentos tensão-deformação de aços ferríticos e soldas, bem como zonas afetadas pelo calor, aços inoxidáveis, dentre outros. Foi demonstrada no trabalho de Haggag et al. (1998) a aplicação da técnica de indentação instrumentada esférica na avaliação da energia para fraturar em termos de um novo parâmetro denominado Energia de Indentação para Fratura. O novo parâmetro descreve claramente a Temperatura de Transição Dúctil-Frágil.

A técnica de indentação instrumentada esférica é uma excelente ferramenta não destrutiva para caracterizar as principais propriedades mecânicas de materiais metálicos. Além disso, esta técnica demonstrou produzir um parâmetro de fratura que pode ser usado para monitorar a Temperatura de Transição Dúctil-Frágil de aços carbono (HAGGAG et al., 1998).

Li et al. (2012) propuseram uma técnica não destrutiva e conveniente para estimar a tenacidade à fratura da liga de alumínio 7050 usando um sistema de indentação equipado com um penetrador Berkovich baseado na mecânica de dano contínuo. Com o aumento das forças de indentação, o dano do material foi percebido no módulo de elasticidade efetivo. Verificou-se que os logaritmos naturais do módulo de elasticidade efetivo em função dos logaritmos naturais da profundidade de indentação plástica apresentam uma relação linear. O módulo de elasticidade efetivo crítico pode ser obtido com base nos conceitos básicos da mecânica do dano

contínuo usando o alongamento do padrão em ensaios de tração uniaxiais. Posteriormente a profundidade crítica de indentação plástica foi obtida usando o método de extrapolação. Consequentemente, a energia de indentação crítica por unidade de área foi obtida com base no ajuste polinomial quadrático entre a força de indentação e a profundidade de indentação plástica, e então o valor da tenacidade à fratura pode ser obtido. Tanto ensaios de indentação quanto ensaios convencionais de compacto de tração foram realizados para verificar a coerência dos resultados.

Jeon et al. (2017) propuseram uma abordagem baseada na mecânica da fratura e na mecânica de contato para estimar a tenacidade à fratura em materiais metálicos a partir de ensaios de indentação instrumentados. Modelos foram desenvolvidos para fratura frágil e dúctil. Diferentes critérios foram aplicados a cada modelo para determinar o ponto crítico de fratura durante a indentação. Para fratura frágil, o ponto crítico de fratura foi definido em termos da pressão média crítica; para fratura dúctil, o ponto crítico de fratura foi derivado da deformação da fratura e do tamanho crítico da zona plástica. Cada critério de fratura foi utilizado para determinar a energia de fratura de indentação correspondente à energia de fratura necessária para a extensão da trinca. A tenacidade à fratura foi estimada para vários materiais metálicos usando cada modelo e comparada com ensaios padrão de tenacidade à fratura.

Li et al. (2015) afirmam que, de modo geral, as abordagens de critério de falha foram classificadas em três categorias: (i) critérios de falha abrupta, (ii) plasticidade de metal poroso e (iii) mecânica de dano contínuo. Na última década, as estruturas de mecânica de dano têm sido usadas como meios úteis para prever o comportamento de falha para uma ampla gama de materiais (metais, compósitos, polímeros, dentre outros).

Mohammadi, Naderi e Iranmanesh (2011) propuseram uma metodologia para estimar a tenacidade à fratura do aço 3Cr-1Mo com base no modelo *Indentation Energy to Fracture* (IEF) e substituindo o indentador de esfera pelo penetrador Vickers. O valor previsto da tenacidade à fratura K_{IC} foi comparado com o valor de K_{IC} obtido a partir das equações de Rolfe-Barsom com base nos resultados do ensaio Charpy V-Notch (CVN). Verificou-se que o erro relativo entre a tenacidade à fratura estimada pelo modelo teórico e a calculada pelo ensaio CVN tem valor admissível igual a 17 %. O erro é relativo ao material acumulado ao redor do penetrador durante o ensaio de indentação. Finalmente, uma triaxialidade de tensão muito maior é avaliada para o ensaio de indentação em relação ao ensaio de tração, mas este valor é semelhante ao valor à frente da ponta da trinca. Esta observação explica a razão dos valores semelhantes de tenacidade à fratura obtidos no ensaio de mecânica de fratura padrão e no modelo IEF.

É possível inferir, pela análise dos trabalhos efetuada, que muitos autores se dedicam a obter a tenacidade à fratura por diferentes métodos. No entanto, não é comum a estimativa da incerteza de medição em seus trabalhos. Estudos como o de Silva (2023b) e o de Rodrigues (2020) são importantes por propor metodologias de cálculo de incerteza de medição para técnicas já conhecidas de vários pesquisadores. Como não foram encontrados trabalhos sobre a incerteza de medição da indentação instrumentada, esta tese contribui para preencher esta lacuna.

2.3.1. Metodologia de Lee et al. (2006)

Lee et al. (2006) propuseram um novo modelo para estimar a tenacidade à fratura de materiais dúcteis baseado na técnica da indentação instrumentada. Esta técnica é relativamente simples de ser implementada e aplicada, ao contrário dos métodos tradicionais de ensaio, que requerem a fabricação de corpos de prova de geometrias e dimensões específicas, além de necessitarem de procedimentos complexos de ensaio.

Os autores mostram que a energia de deformação na indentação para uma certa profundidade de indentação pode ser correlacionada com a energia requerida para a fratura de materiais dúcteis. Lee et al. (2006) afirmam que os métodos de indentação instrumentada desenvolvidos até o momento da publicação do seu trabalho poderiam ser aplicados apenas em materiais frágeis e com baixa tenacidade à fratura ($K_{IC} \leq 10 \text{ MPa(m)}^{0.5}$) ou em baixo nível de energia em regiões de transição de temperatura dúctil-frágil de materiais dúcteis. O fato da indentação não provocar trincas severas em materiais dúcteis fez com que a estimativa da tenacidade à fratura de materiais dúcteis por meio de indentação ainda ficasse sem solução.

O desenvolvimento do modelo de Lee et al. (2006) é o seguinte. Para uma trinca de comprimento $2a$ em uma superfície infinita, a tenacidade à fratura K_{IC} é dada pela Eq. (2.8).

$$K_{IC} = \sigma_f \sqrt{\pi a} \quad (2.8)$$

Em que σ_f é a tensão de tração remota na fratura. De acordo com a teoria de Griffith, σ_f é dado por Eq. (2.9).

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2Ew_f}{\pi a}} \quad (2.9)$$

Na Equação (2.9), E é o módulo de elasticidade e w_f é a energia por unidade de área requerida para criar uma superfície de trinca (ou a região de deformação à frente da ponta da trinca).

A combinação das Eqs. (2.8) e (2.9) oferece a relação entre as variáveis K_{JC} e w_f , Eq. (2.10). Esta equação se aplica em quaisquer configurações e não apenas em superfícies infinitas, conforme demonstrado por Irwin (1957).

$$K_{JC} = \sqrt{2Ew_f} \quad (2.10)$$

Para estimar o valor de K_{JC} por meio da técnica de indentação instrumentada, deve-se utilizar apenas parâmetros de indentação. A energia de indentação crítica é estimada a partir da curva de força-profundidade, conforme a Eq. (2.11).

$$2w_f = \lim_{h \rightarrow h^*} \int_0^h \frac{4L}{\pi d^2} dh \quad (2.11)$$

Na Equação (2.11), L é a força de indentação aplicada, h é a profundidade de indentação, d é o diâmetro de impressão de dureza e h^* consiste na profundidade de indentação crítica correspondente ao ponto de início da fratura.

Como não existem marcas características para identificar a fratura na indentação, h^* na Eq. (2.11) não pode ser medido por métodos diretos, como microscopia óptica ou microscopia eletrônica de varredura. Por esse motivo, o equacionamento apresentado a seguir é fundamental para a obtenção do valor deste parâmetro. O dano D pode ser calculado como função do módulo de elasticidade E do material, Eq. (2.12). Ainda, pela Eq. (2.13), é possível obter o módulo de elasticidade do material com dano E_D em função do dano e do módulo de elasticidade do material não danificado. É possível concluir que E_D diminui à medida que o dano do material aumenta.

$$D = 1 - \frac{E_D}{E} \quad (2.12)$$

$$E_D = E(1 - D) \quad (2.13)$$

Assumindo que o possível dano abaixo do indentador aumenta com o incremento da profundidade de indentação, E_D pode também diminuir durante a indentação. Assim sendo, E_D pode ser representado com parâmetros de indentação, conforme a Eq. (2.14).

$$E = \frac{1-\nu^2}{\left(\frac{1}{E_r} - \frac{1-\nu_i^2}{E_i}\right)} = \frac{1-\nu^2}{\left(\frac{2\sqrt{A_C}}{\sqrt{\pi}S} - \frac{1-\nu_i^2}{E_{ind}}\right)} \quad (2.14)$$

Na Equação (2.14), ν é o coeficiente de Poisson do material, ν_i é o coeficiente de Poisson do indentador, E_r é o módulo de elasticidade reduzido, E_{ind} é o módulo de elasticidade do indentador, A_C é a área de contato entre o indentador e o material e S é a rigidez de contato da curva de descarregamento.

Os valores de E_D podem ser calculados para várias profundidades de indentação em cada ciclo de descarregamento. A Figura 2.3 mostra exemplos de decréscimo de E_D com o aumento de h obtido a partir da indentação para quatro diferentes materiais.

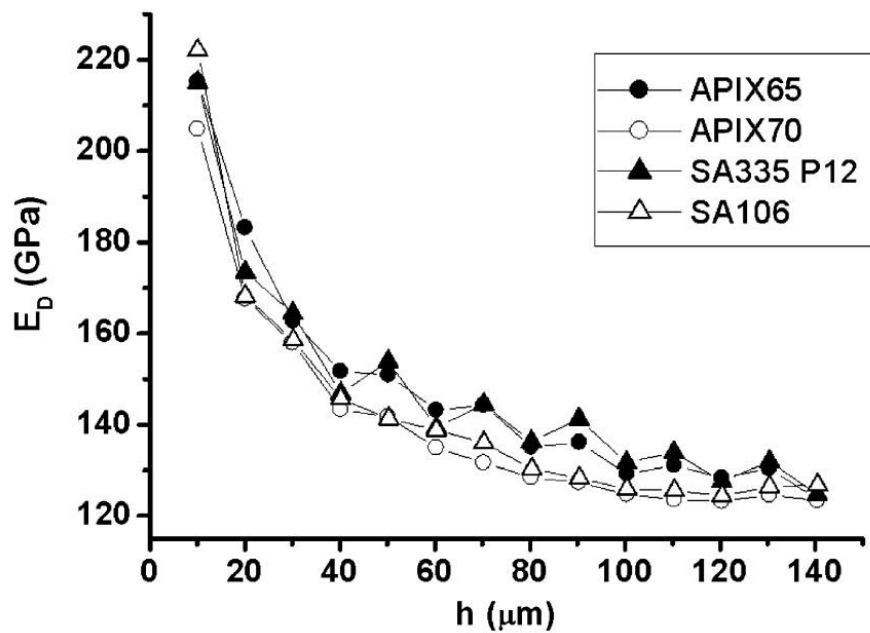


Figura 2.3 – Alteração no módulo de elasticidade do material com dano em função da profundidade de indentação para quatro diferentes materiais. Fonte: Lee et al. (2006).

Se o valor crítico do módulo de elasticidade do material com dano E_D^* , que é o módulo de elasticidade do material com dano no início da fratura, puder ser obtido pela Fig. 2.3, é possível obter h^* que é a profundidade de indentação no ponto de início da fratura. O valor de

E_D^* pode ser obtido a partir do valor de dano crítico D^* , Eq. (2.6). O material abaixo do indentedor experimenta tensões localizadas de cisalhamento devido à força de compressão da indentação no eixo do carregamento. Se as tensões de cisalhamento induzem nucleações de vazios, a fração de volume de vazios (f) pode aumentar com o incremento da força de indentação esférica. Quando a fração de volume de vazios aumenta, o valor de D também aumenta. D pode ser representado em termos de f conforme a Eq. (2.15). Já a Equação (2.16) representa f em função da variável D .

$$D = \frac{\pi}{\left(\frac{4}{3}\pi\right)^{\frac{2}{3}}} f^{\frac{2}{3}} \quad (2.15)$$

$$f = \frac{\frac{4}{3}\pi}{\pi^{\frac{2}{3}}} D^{\frac{3}{2}} \quad (2.16)$$

Desta forma, o valor de dano crítico (D^*) pode ser determinado ao se conhecer a fração de volume de vazios crítica (f^*), que representa o valor de f no ponto de início da fratura. Análises numéricas indicam um valor de f^* aproximadamente igual a 0,25 para materiais dúcteis. Este valor pode ser empregado para determinar o valor crítico do módulo de elasticidade do material com dano e, conseqüentemente, o respectivo ponto de início da fratura durante a indentação. Portanto, é possível determinar o valor de dano crítico D^* inserindo o valor de f^* na Eq. (2.15). Depois, obtém-se o valor de E_D^* a partir da Eq. (2.13). Por fim, h^* , que é requerido para resolver a Eq. (2.11), pode ser obtido como sendo a profundidade correspondente ao módulo de elasticidade crítico do material com dano E_D^* , a partir de gráficos como o da Fig. 2.3 ou de regressões que geram curvas relacionando os dois parâmetros.

2.4.2. Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a)

Zhang, Wang e Wang (2019a) propuseram um modelo para o cálculo da tenacidade à fratura baseado na taxa de liberação de energia. Nele, U_D , que é a energia do dano de deformação, é calculado em cada ciclo de indentação, conforme a Fig. 2.4. A curva OAB é medida experimentalmente. Assume-se que exista uma recuperação do dano após o descarregamento total (no ponto B), E_{eff} , Eq. (2.17), se torna E_0 novamente e, portanto, a curva de recarga pode ser teoricamente determinada (R_0 e h_r são obtidos pelas Eqs. (2.18) e (2.19), respectivamente). Quando o recarregamento atinge a força máxima, o dano ocorre e evolui para

o estado anterior ao descarregamento prévio. Assim sendo, a curva de descarregamento ainda   AB. U_D é calculado pela Eq. (2.20).

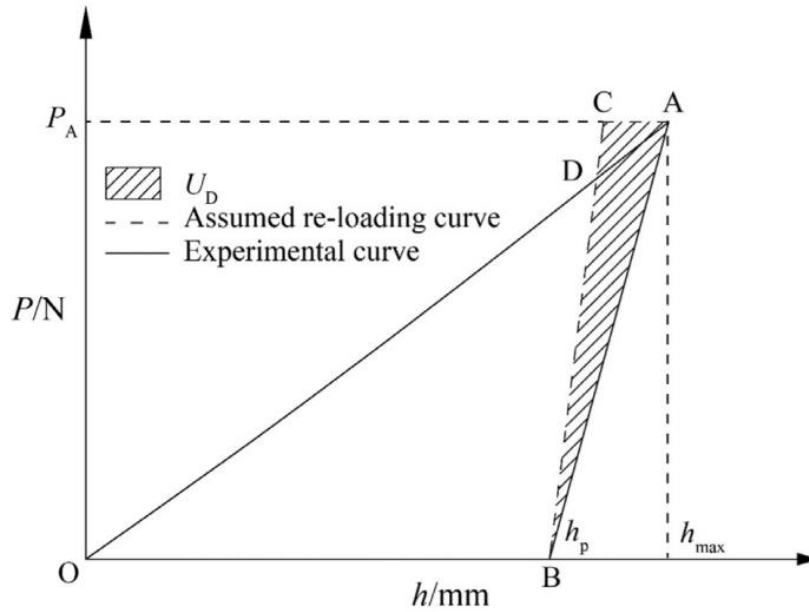


Figura 2.4 – Energia do dano de deformação para um ciclo de indentação. Fonte: Zhang, Wang e Wang (2019a).

$$E_{eff} = \frac{1-\nu^2}{2 \sqrt{\frac{h_r R_{ind} R_0}{R_0 - R}} \frac{(1-\nu^2)}{S} - \frac{E_{ind}}{E_{ind}}} \quad (2.17)$$

Na Equação (2.17), E_{eff} é o módulo de elasticidade efetivo, ν é o coeficiente de Poisson do material ensaiado, h_r   a profundidade de recarregamento, R_{ind} consiste no raio do indentador esférico; R_0   o raio da indentação residual, S   a rigidez de contato da curva de descarregamento e E_{ind} é o módulo de elasticidade do indentador.

$$R_0 = \frac{h_p^2 + (2h_{max}R - h_{max}^2)}{2h_p} \quad (2.18)$$

Na Equação (2.18), R_0   o raio de indentação residual; h_{max} é a profundidade máxima do indentador e h_p consiste na profundidade plástica do indentador.

$$h_r = h - h_p \quad (2.19)$$

Sendo h , na Eq. (2.19), a profundidade de indentação.

$$U_D(i) = \frac{1}{2} P_{maxi}(i) \left(h_{max}(i) - h_p(i) - \frac{P_{max}(i)}{S_0(i)} \right) \quad (2.20)$$

Na Equação (2.20), $P_{maxi}(i)$ é a força máxima de indentação no ciclo i e $S_0(i)$ é a inclinação teórica do descarregamento no ciclo i .

A área equivalente da trinca no ciclo i $A_{eq}(i)$ é calculada pela Eq. (2.21). Já o raio de contato efetivo a_{eff} e o dano $D(i)$ são obtidos por meio das Eqs. (2.22) e (2.23) respectivamente.

$$A_{eq}(i) = \pi a_{eff}^2 D(i) \quad (2.21)$$

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{h_r R_{ind} R_0}{R_0 - R}} \quad (2.22)$$

$$D = 1 - \frac{E_{eff}}{E_0} \quad (2.23)$$

Sendo E_0 , na Eq. (2.23), o módulo de elasticidade do material não danificado.

A Figura 2.5 contém um exemplo de regressão linear com A_{eq} - U_D . O valor de J_{SIT} (taxa de liberação de energia) é igual ao coeficiente angular da reta ajustada.

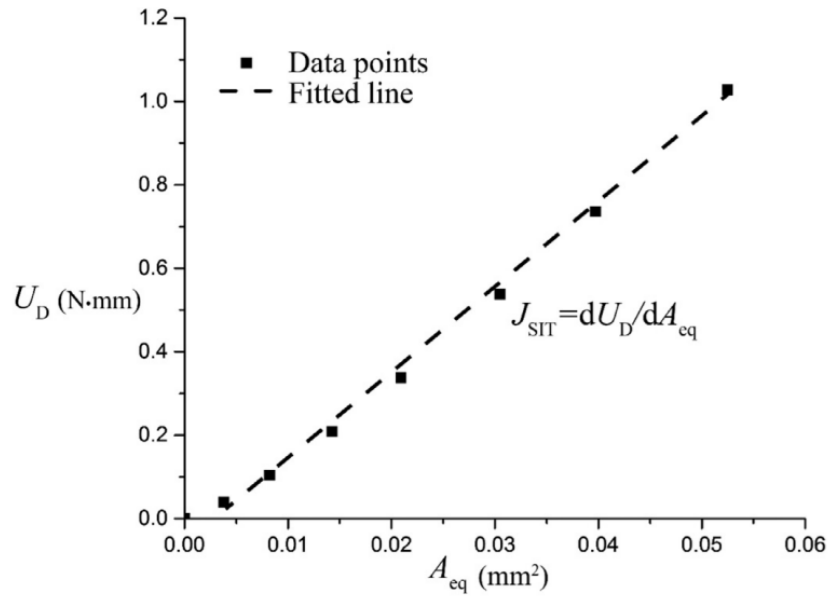


Figura 2.5 – Ajuste de reta no gráfico de U_D em função de A_{eq} . Fonte: Zhang, Wang e Wang (2019a).

Por fim, o fator de intensidade de tensão crítica de modo II K_{IIC} e a tenacidade à fratura (K_{IC}) são determinados pelas Eqs. (2.24) e (2.25), respectivamente.

$$K_{IIC} = \sqrt{\frac{E_0}{1-\nu^2} J_{SIT}} \quad (2.24)$$

$$K_{IC} = \frac{K_{IIC}}{\alpha} \quad (2.25)$$

Sendo α na Eq. (2.25) a razão entre a tensão crítica de cisalhamento e a tensão crítica normal, ou ainda $\alpha = K_{IIC}/K_{IC}$ e $\alpha^2 = J_{IIC}/J_{IC}$.

2.4.3. Metodologia de Yu et al. (2023)

Yu et al. (2023) apresentaram uma nova metodologia envolvendo indentação instrumentada para a obtenção de propriedades de tração dos materiais e tenacidade à fratura por meio das curvas de carregamento e descarregamento. As propriedades de tração são estimadas utilizando uma abordagem de tensão-deformação com uma correção com base na lei de potência de Meyer. Já para a tenacidade à fratura, uma nova função adimensional é definida a partir de análise dimensional e do método computacional dos elementos finitos.

A relação entre a tensão representativa σ_{IT} e a pressão de contato da indentação P_m é expressa pela Eq. (2.26).

$$\sigma_{IT} = \frac{1}{\Psi} \cdot \frac{F_{max}}{A_C} = \frac{P_m}{\Psi} \quad (2.26)$$

Na Equação (2.26), F_{max} é a máxima força na reta de descarregamento do ensaio de indentação instrumentada; $A_C = \pi a^2$ é a área de contato, em que a é o raio de contato considerando o *pile-up/sink-in*; Ψ é um fator de restrição plástica igual a 3,0 de acordo com a norma ISO/TR 29381 (ISO, 2008).

Com relação à deformação representativa ε_{IT} , considerando um indentador esférico, Ahn e Kwon (2001) propuseram a Eq. (2.27).

$$\varepsilon_{IT} = \frac{\xi}{\sqrt{1-(a/R)^2}} \frac{a}{R} \quad (2.27)$$

Sendo, na Eq. (2.11), R igual ao raio do indentador e ξ é uma constante de valor 0,14 de acordo com a ISO/TR 29381 (ISO, 2008). O raio de contato considerando o *pile-up/sink-in* é obtido por meio da Eq. (2.28).

$$a = \sqrt{2Rh - h_c^2} = \sqrt{\frac{5(2-n)}{2(4+n)}} (2Rh_c^* - h_c^{*2}) \quad (2.28)$$

Na Equação (2.28), h_c é a profundidade de contato considerando o efeito de *pile-up/sink-in*, n é o expoente de encruamento de materiais metálicos e h_c^* é a profundidade de contato sem considerar o efeito *pile-up/sink-in*. Para encontrar o valor de h_c^* , deve-se aplicar a Eq. (2.13).

$$h_c^* = h_{max} - \omega \frac{F_{max}}{S} \quad (2.29)$$

Na Equação (2.29), h_{max} é a máxima profundidade de indentação no descarregamento, ω é uma constante de valor 0,75 para indentadores esféricos e S é a rigidez de contato da curva de descarregamento. Para obter o valor de n , a tensão e deformação são combinadas na equação da lei de potência de Hollomon, Eq. (2.30).

$$\sigma = K(\varepsilon_{IT})^n \quad (2.30)$$

Na Equação (2.30), σ é a tensão constitutiva e K é o coeficiente de resistência. Para se obter os valores de K e n , deve-se empregar uma função de otimização não linear do método dos mínimos quadrados, por meio de *softwares* como o MATLAB. Para determinar a tensão de início do escoamento de materiais metálicos, a lei de potência de Meyer é adotada, Eq. (2.31).

$$\frac{F_{max}}{4a^2} = \eta \left(\frac{a}{R} \right)^{M-2} \quad (2.31)$$

Na Equação (2.31), M é o coeficiente de Meyer e η é o parâmetro do material, que pode ser obtido de uma análise de regressão de $F_{max}/4a^2$ versus a/R , considerando todos os ciclos do ensaio de indentação instrumentada. Ao obter η a tensão de início do escoamento (σ_y) pode ser calculada por meio da equação empírica expressa na Eq. (2.32).

$$\sigma_y = \beta_m \eta + c \quad (2.32)$$

Na Equação (2.32), β_m e c são constantes que independem do tratamento térmico do material. Haggag et al. (1989) recomendou o uso de $\beta_m = 0,2285$ e $c = 0$ para todos os aços-carbono. Os valores de E (módulo de elasticidade do material) são obtidos por meio da Eq. (2.7), que também pode ser expressa conforme a Eq. (2.33).

$$E = \frac{1-\nu^2}{\left(\frac{2a\beta}{S} \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \right)} \quad (2.33)$$

Na Equação (2.33), β é uma constante de valor 1 para indentadores simétricos. Assim sendo, é possível definir uma equação de P_m^{cr} , a máxima pressão de contato do indentador na ocorrência da máxima energia de deformação, e σ_y em função de E , σ_y e n , Eq. (2.34).

$$\frac{P_m^{cr}}{\sigma_y} = A \left(\frac{E}{\sigma_y} \right) n^2 + B \left(\frac{E}{\sigma_y} \right) n + C \left(\frac{E}{\sigma_y} \right) \quad (2.34)$$

Deste modo, $A(E/\sigma_y)$, $B(E/\sigma_y)$ e $C(E/\sigma_y)$ estão em função de E/σ_y e podem ser expressas conforme as Eqs. (2.35), (2.36) e (2.37).

$$A\left(\frac{E}{\sigma_y}\right) = a_1\left(\frac{E}{\sigma_y}\right)^2 + a_2\left(\frac{E}{\sigma_y}\right) + a_3 \quad (2.35)$$

$$B\left(\frac{E}{\sigma_y}\right) = b_1\left(\frac{E}{\sigma_y}\right)^2 + b_2\left(\frac{E}{\sigma_y}\right) + b_3 \quad (2.36)$$

$$C\left(\frac{E}{\sigma_y}\right) = c_1\left(\frac{E}{\sigma_y}\right)^2 + c_2\left(\frac{E}{\sigma_y}\right) + c_3 \quad (2.37)$$

Os coeficientes $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ e c_3 são apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2 para os raios do indentador iguais a 0,25 mm e 0,5 mm, respectivamente.

Tabela 2.1 – Coeficientes das Eq. (2.19), (2.20) e (2.21) para o indentador de raio 0,25 mm.

Fonte: Yu et al. (2023).

Valores dos coeficientes		
$a_1 = -6,9647952\text{e-}05$	$a_2 = 2,8676009\text{e-}01$	$a_3 = 1,3149355\text{e+}01$
$b_1 = 7,8009812\text{e-}06$	$b_2 = -5,8445479\text{e-}02$	$b_3 = 8,8048031\text{e+}00$
$c_1 = -1,0604156\text{e-}06$	$c_2 = 4,9126291\text{e-}03$	$c_3 = 2,4737926\text{e+}00$

Tabela 2.2 – Coeficientes das Eq. (2.19), (2.20) e (2.21) para o indentador de raio 0,5 mm.

Fonte: Yu et al. (2023).

Valores dos coeficientes		
$a_1 = -5,9445493\text{e-}05$	$a_2 = 2,2972084\text{e-}01$	$a_3 = 2,8090928\text{e+}00$
$b_1 = 2,7378123\text{e-}06$	$b_2 = -3,8071517\text{e-}02$	$b_3 = 9,9925525\text{e+}00$
$c_1 = -4,5563025\text{e-}07$	$c_2 = 3,2037186\text{e-}03$	$c_3 = 2,3851370\text{e+}00$

Finalmente, para calcular a tenacidade à fratura $K_{Jc,IIC}$, utiliza-se os equacionamentos expressos nas Eqs. (2.38) e (2.39). A energia crítica de indentação $J_{Ic,IIC}$ é obtida por meio da Eq. (2.38).

$$J_{Ic,IIT} = \lim_{h \rightarrow h_{cr}} \int_0^h P_m dh \quad (2.38)$$

O valor da integral de $J_{Ic,III}$ pode ser convertido em $K_{Jc,III}$, que é o fator de intensidade de tensão crítica de modo I, conforme a Eq. (2.39).

$$K_{Jc,III} = \sqrt{\frac{E \cdot J_{Ic,III}}{1 - \nu^2}} \quad (2.39)$$

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo, as etapas necessárias para a realização do presente trabalho são especificadas e detalhadas. Para estimar a incerteza dos valores de tenacidade à fratura relativas às metodologias de cálculo abordadas nesta tese, foi preciso identificar todas as variáveis de entrada e de saída (mensurandos) que fazem parte das equações propostas pelos autores dos trabalhos citados. Em seguida, foram propostos os modelos matemáticos adequados para obtenção das incertezas de medição, conforme o método GUM (empregado nos casos em que as derivadas parciais dos modelos matemáticos em relação às variáveis de entrada eram simples de serem obtidas por métodos analíticos) ou o método de Monte Carlo (utilizado nos casos em que as derivadas parciais dos modelos matemáticos em relação às variáveis de entrada eram complexas). Por fim é feita uma avaliação metrológica e estatística dos valores de tenacidade à fratura fornecidos pelas três metodologias consideradas neste estudo. Foram tomados como referência os valores de tenacidade obtidos experimentalmente por Melo (2019). Entretanto, como esta tese é dedicada ao cálculo da incerteza de uma importante propriedade mecânica (tenacidade à fratura) informações sobre o material ensaiado, sobre os ensaios realizados e os resultados decorrentes são também apresentadas, ANEXO 1. Isto porque foram realizados por outros pesquisadores. É válido mencionar que a metodologia apresentada nesta tese é válida para qualquer material.

3.1. Resumo das Propriedades do Material e do Ensaio Realizado

Para a estimativa da incerteza associada ao ensaio de indentação instrumentada, foi utilizado o aço denominado 4130 M, por ter uma composição química muito semelhante à do aço AISI 4130, ANEXO 1.

O material utilizado neste trabalho, que apresenta comportamento dúctil, foi fornecido na forma de tubos utilizado para a perfuração de poços de exploração de petróleo, cuja composição química e caracterização microestrutural foram previamente descritas por Melo (2019) e Almeida (2022). Este aço possui grãos prévios austeníticos refinados e equiaxiais, uma microestrutura composta de mistura de martensita/bainita, grãos de ferrita e precipitados de cementita, com inclusões de CaS de aspecto circular, finamente dispersa na matriz e sem bandejamento microestrutural. Sua dureza Rockwell C é 27,0 HRC com uma incerteza padrão de 0,4 HRC para probabilidade de abrangência de 68,27 %. Três ensaios de indentação instrumentada foram efetuados para obtenção dos valores de tenacidade à fratura. Em cada ensaio, foram realizados 12 ciclos de indentação com aplicação progressiva de força. Portanto, os valores de todas as variáveis e de todos os mensurandos foram calculados 12 vezes em um determinado ensaio. Os ensaios foram realizados em um equipamento de indentação equipado com um *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) de resolução 0,0001 mm e faixa nominal de 1,016 mm, que coleta os valores de profundidade do indentador, e uma célula de carga de resolução 0,1 N e faixa nominal de 4 448,2 N, para medição dos valores de força aplicada. A temperatura na sala de medição foi mantida a $24,0 \pm 1,0$ °C durante a realização dos ensaios. Ela foi monitorada por meio de um termo-higrômetro de resolução 0,1 °C e faixa de medição de -20,0 °C a 60,0 °C.

Foi utilizado um indentador de carboneto de tungstênio de formato esférico, uma vez que algumas equações utilizadas neste trabalho são válidas apenas para indentadores esféricos. A escolha do carbeto de tungstênio se deu pelo fato deste material apresentar elevada rigidez, com módulo de elasticidade equivalente a 710 000 MPa.

A Figura 3.1 mostra o equipamento de indentação instrumentada utilizado para coletar os valores dos ensaios analisados neste trabalho.

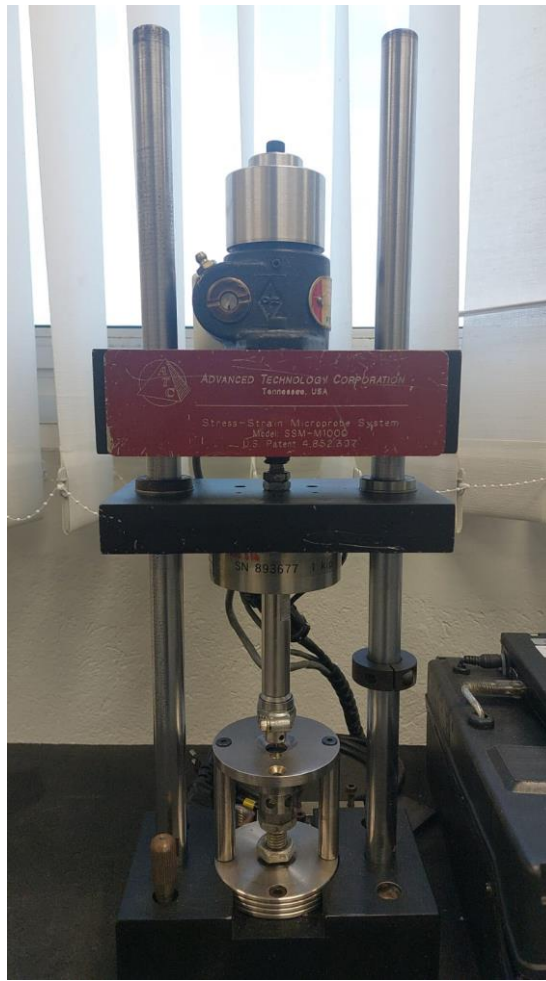


Figura 3.1 – Dispositivo de indentação *in situ* SSM-M1000TM. Fonte: Silva (2023a).

3.2. Metodologia de Lee et al. (2006)

Para determinar a incerteza associada à tenacidade à fratura obtida aplicando a metodologia de Lee et al. (2006), inicialmente foram identificadas as variáveis de influência e as variáveis de saída ou mensurandos, em seguida, foram calculadas as incertezas padrão de acordo com os modelos matemáticos aplicáveis em cada caso.

Para estimar a tenacidade à fratura pela metodologia de Lee et al. (2006), deve-se primeiramente coletar os valores das variáveis profundidade máxima de indentação (h_{maxi}), força máxima de indentação (P_{maxi}) e coeficiente angular da reta de descarregamento (S_i). Os valores destas três variáveis devem ser determinados em cada um dos 12 ciclos de indentação.

Em seguida, estima-se os valores da profundidade de indentação sem considerar o efeito *pile-up/sink-in* (h_c^*) também para os 12 ciclos por meio da Eq. (3.1).

$$hc^* = h_{maxi} - (0,75 \cdot \frac{P_{maxi}}{Si}) \quad (3.1)$$

Na sequência, estima-se o módulo de elasticidade do material com dano (E_D) para os 12 ciclos de indentação, conforme a Eq. (3.2).

$$E_D = \frac{(1-\nu^2)}{\frac{2 \cdot a^*}{Si} - \frac{(1-\nu_{ind}^2)}{E_{ind}}} \quad (3.2)$$

Deve-se observar que o raio devido ao *pile-up/sink-in* (a^*) é calculado pela Eq. (3.3).

$$a^* = \sqrt{\frac{5(2-n)}{2(4+n)} ((2 \cdot R_{ind} \cdot hc^*) - hc^{*2})} \quad (3.3)$$

A incerteza padrão dos coeficientes de Poisson do material ensaiado (ν) e do material do indentador (ν_{ind}) são calculados conforme as Eqs. (3.4) e (3.5). A avaliação destas incertezas é do Tipo B, com distribuição de probabilidade retangular e infinitos graus de liberdade efetivos.

$$u(\nu) = \frac{0,1 \cdot \nu}{\sqrt{3}} \quad (3.4)$$

$$u(\nu_{ind}) = \frac{0,1 \cdot \nu_{ind}}{\sqrt{3}} \quad (3.5)$$

É feito então um ajuste de reta do logaritmo natural de E_D em função do logaritmo natural de hc^* multiplicado por 1000. Esta etapa é realizada considerando os 12 ciclos de indentação. Ela também é de fundamental importância tendo em vista os passos que se seguem.

Para estimar o valor do módulo de elasticidade do material com dano crítico E_D^* , utiliza-se a Eq. (3.6). A referida equação, por sua vez, depende do resultado do dano crítico D^* , que é obtido pela Eq. (3.7) e considerando o valor da fração de volume de vazio crítica (f^*) igual a 0,11 para materiais dúcteis (LEE et al., 2006).

$$E_D^* = E(1 - D^*) \quad (3.6)$$

$$D^* = \frac{\pi}{\left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3}} \cdot f^{*2/3} \quad (3.7)$$

Deve-se calcular o $\ln$ de E_D^* para obter, por meio do gráfico $\ln(E_D)$ em função do $\ln(h_c^*)$, o valor de h^* (Eq. 3.8).

$$h^* = (2,718^{\ln(h^*)})/1000 \quad (3.8)$$

Na sequência, deve-se elaborar o gráfico de potência da pressão P_{mi} em função de h/R_{ind} . A pressão P_{mi} é calculada para os 12 ciclos conforme a Eq. (3.9) e h/R_{ind} é estimado pela Eq. (3.10).

$$P_{mi} = \frac{P_{maxi}}{\pi \cdot a^{*2}} \quad (3.9)$$

$$\frac{h}{R} i = \frac{h_{maxi}}{R_{ind}} \quad (3.10)$$

Para se obter o valor de P_m^* , substitui-se h^*/R_{ind} no gráfico de P_{mi} em função de h/R_{ind} . Em seguida, multiplica-se o valor de P_m^* por h^* para resolver a integral característica da metodologia de Lee et al. (2006), conforme Eq. (2.11). O valor obtido corresponde a $2wf$. Por fim, calcula-se K_{JC} por meio da Eq. (2.10).

3.2.1. Cálculo da incerteza associada à profundidade de indentação sem considerar o efeito pile-up/sink-in (h_c^*)

A incerteza de h_c^* (Eq. 3.1) foi obtida por meio do método de Monte Carlo. Assim sendo, foram estimadas as incertezas padrão da profundidade máxima de indentação em cada ciclo i h_{maxi} , da constante ω , da força máxima aplicada em cada ciclo i P_{maxi} e do coeficiente angular da reta de descarregamento de cada ciclo de indentação S_i .

O sistema de medição de h_{maxi} é o LVDT, um sensor utilizado para a medição de deslocamento com resolução de 0,0001 mm e faixa nominal 1,016 mm. Neste caso, é medida a variação de posição do indentador que se move contra o corpo de prova analisado. Como são adquiridos muitos valores de profundidade em um mesmo ensaio, é possível fazer o tratamento estatístico dos dados com o intuito de calcular a incerteza associada a esta variável. Desta forma, são coletados cerca de 700 valores de deslocamento do indentador pelo LVDT por ciclo de medição e são considerados os quinze maiores valores de profundidade de indentação para a estimativa da incerteza de medição relacionada à variabilidade das leituras (tipo A) em cada um

dos 12 ciclos. O modelo matemático relativo ao cálculo da incerteza de medição do parâmetro h_{maxi} também contém as incertezas relacionadas à resolução e à calibração do LVDT (ambas do tipo B). A Equação (3.11) apresenta o modelo matemático para cálculo da incerteza de h_{maxi} .

$$u(h_{maxi}) = \overline{h_{maxi}} + \Delta R_{LVDT} + \Delta I_{c_{LVDT}} \quad (3.11)$$

Na Equação (3.11), $\overline{h_{maxi}}$ é a variabilidade das leituras de h_{maxi} no ciclo i ; ΔR_{LVDT} é a contribuição da resolução do LVDT no valor da incerteza de h_{maxi} ; e $\Delta I_{c_{LVDT}}$ é a contribuição da incerteza da calibração do sistema de medição no valor da incerteza de h_{maxi} . A incerteza padrão associada a $\overline{h_{maxi}}$ é calculada conforme a Eq. (3.12), sendo sh_{maxi} o desvio padrão dos valores de profundidade coletados. Ainda na Eq. (3.12), o tipo de avaliação é A, com 14 graus de liberdade para uma distribuição de probabilidade *t-Student*.

$$u(\overline{h_{maxi}}) = \frac{sh_{maxi}}{\sqrt{15}} \quad (3.12)$$

Para o cálculo das incertezas padrão de ΔR_{LVDT} e $\Delta I_{c_{LVDT}}$, são utilizadas as Eqs. (3.13) e (3.14). Para a primeira variável é efetuada uma avaliação do Tipo B, considerando uma distribuição retangular com infinitos graus de liberdade. Já para a segunda variável a distribuição de probabilidade adotada é a normal e foi efetuada uma avaliação do tipo B, com infinitos graus de liberdade.

$$u(\Delta R_{LVDT}) = \frac{R_{LVDT}}{\sqrt{3}} \quad (3.13)$$

$$u(\Delta I_{LVDT}) = \frac{I_{LVDT}}{k_{LVDT}} \quad (3.14)$$

Nas Equações (3.13) e (3.14), R_{LVDT} é a resolução do LVDT, I_{LVDT} consiste na incerteza associada à calibração do sistema de medição e k_{LVDT} é o fator de abrangência para um nível de confiabilidade de 95,45 %.

O valor da variável P_{maxi} , que consiste na força máxima aplicada em um ciclo de indentação, é obtido por meio da medição com a célula de carga instalada no equipamento de indentação, com resolução de 0,1 N e faixa nominal 4448,2 N. A incerteza padrão de P_{maxi} é uma combinação das incertezas das seguintes variáveis de entrada: variabilidade das leituras de

força máxima, resolução da célula de carga e calibração do sistema de medição. Como mencionado, os vários valores de força coletados no ensaio de indentação geram uma faixa que representa a força máxima aplicada. Desta forma, são considerados os quinze maiores valores de força de cada ciclo de indentação para estimar a incerteza de P_{maxi} . A incerteza associada à variabilidade das leituras de P_{maxi} é do tipo A, pois é calculada por métodos estatísticos. Já as incertezas relacionadas à resolução e à calibração da célula de carga são do tipo B.

O modelo matemático utilizado para o cálculo da incerteza de P_{maxi} é expresso na Eq. (3.15).

$$u(P_{maxi}) = \overline{P_{maxi}} + \Delta R_{cc} + \Delta I_{cc} \quad (3.15)$$

Na Equação (3.15), $\overline{P_{maxi}}$ é a variabilidade das leituras de P_{maxi} no ciclo i ; ΔR_{cc} é a contribuição da resolução da célula de carga no valor da incerteza de P_{maxi} ; ΔI_{cc} é a contribuição da incerteza da calibração do sistema de medição no valor da incerteza de P_{maxi} . Para calcular a incerteza associada a $\overline{P_{maxi}}$, a seguinte expressão é utilizada (Eq. 3.16).

$$u(\overline{P_{maxi}}) = \frac{sP_{maxi}}{\sqrt{15}} \quad (3.16)$$

Na Equação (3.16), sP_{maxi} consiste no desvio padrão dos 15 valores de força máxima coletados no ensaio de indentação instrumentada. As Equações (3.17) e (3.18) permitem calcular as incertezas padrão de ΔR_{cc} e ΔI_{cc} .

$$u(\Delta R_{cc}) = \frac{R_{cc}}{\sqrt{3}} \quad (3.17)$$

$$u(\Delta I_{cc}) = \frac{I_{cc}}{k_{cc}} \quad (3.18)$$

Na Equação (3.17), R_{cc} é a resolução da célula de carga. Já na Eq. (3.18), I_{cc} é a incerteza relacionada à calibração do sistema de medição com probabilidade de abrangência de 95,45 % e k_{cc} é o fator de abrangência utilizado na determinação da incerteza expandida da calibração, numericamente igual a 2,00. Ambas as incertezas mencionadas são do tipo B, sendo a incerteza associada à resolução da célula de carga com distribuição de probabilidade retangular e a

incerteza associada à calibração do sistema de medição com distribuição de probabilidade normal.

A variável ω é uma constante de valor 0,75 para indentadores esféricos. Assim sendo, sua incerteza padrão foi calculada como sendo 1 % do valor fornecido pela equação característica da incerteza padrão de distribuição de probabilidade retangular. O valor de 1 % foi adotado para quase todas as constantes desta tese, exceto quando a variável em questão é obtida por meio de interpolação. A Equação (3.19) contém a expressão para o cálculo desta incerteza.

$$u(\omega) = \frac{0,01 \cdot \omega}{\sqrt{3}} \quad (3.19)$$

O parâmetro S_i consiste no coeficiente angular da reta de descarregamento de cada ciclo de indentação. A incerteza padrão desta variável é classificada como do tipo B com distribuição de probabilidade retangular, Eq. (3.20). De acordo com Arencibia et al. (2015), a incerteza associada à aplicação do Método dos Mínimos Quadrados é quase nula. Por esse motivo, a equação característica da distribuição retangular neste caso é multiplicada por 0,0001 (0,01 % de contribuição da variável S_i)

$$u(S_i) = \frac{0,0001 \cdot S_i}{\sqrt{3}} \quad (3.20)$$

3.2.2. Cálculo da incerteza associada a P_{mi}

A equação para o cálculo da pressão P_{mi} é a seguinte (Eq. 3.21). Após estimar os valores das incertezas padrão, aplica-se o método de Monte Carlo nesta equação. O software Microsoft Excel® foi utilizado para este propósito. Em todos os casos foram realizadas 1 000 000 de iterações e os valores simulados foram propagados utilizando as equações matemáticas correspondentes.

$$P_{mi} = \frac{P_{maxi}}{\pi \cdot ((2 \cdot R_{ind} \cdot h_c^*) - h_c^{*2})} \quad (3.21)$$

A incerteza padrão combinada do raio do indentador envolve a variabilidade das leituras efetuadas no microscópio, a resolução do equipamento e a incerteza associada à calibração do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A Equação (3.22) expressa o modelo matemático para cálculo da incerteza padrão associada ao raio do indentador.

$$u(R_{ind}) = \overline{R_{ind}} + \Delta R_{MEV} + \Delta Ic_{MEV} \quad (3.22)$$

Na Equação (3.22), $\overline{R_{ind}}$ consiste na variabilidade das leituras de R_{ind} , ΔR_{MEV} é a contribuição da resolução do MEV no valor da incerteza de R_{ind} e ΔIc_{MEV} é a contribuição da incerteza da calibração do sistema de medição no valor da incerteza de R_{ind} .

Por não haver informações de certificados de calibração relativas ao raio do indentador, a variável R_{ind} (raio do indentador) foi medida utilizando-se um Microscópio Eletrônico de Varredura do fabricante Zeiss, modelo Supra 40, de resolução 0,0001 mm. Assim sendo, é possível fazer o tratamento estatístico dos dados coletados, uma vez que são medidos três valores do referido raio.

3.2.3. Cálculo da incerteza de $P_{mi} \cdot h^*$

A expressão $P_{mi} \cdot h^*$ é numericamente igual a $2wf$. Para obter sua incerteza, basta aplicar o método de Monte Carlo, uma vez que já se conhece a incerteza dos dois fatores da expressão.

3.2.4. Cálculo da incerteza de K_{JC}

A tenacidade à fratura K_{JC} é obtida por meio da Eq. (3.23).

$$K_{JC} = \sqrt{2E_0wf} \quad (3.23)$$

Para estimar a incerteza associada à tenacidade, aplica-se o método de Monte Carlo. No entanto, é necessário conhecer a incerteza do módulo de elasticidade do material ensaiado E_0 .

A incerteza de E_0 é tratada estatisticamente, pois foram efetuadas medições desse parâmetro com uma máquina de ensaio de tração do fabricante Instron, modelo 8801, com resolução de 0,1 N. Foram coletados cinco valores de módulo de elasticidade do material ensaiado para que a análise estatística pudesse ser realizada. Portanto, a incerteza padrão relacionada à variabilidade das leituras nesta máquina é do tipo A. Também são consideradas as incertezas relacionadas à resolução da máquina e à incerteza de sua calibração. Ambas são do tipo B com distribuição de probabilidade retangular. A Equação (3.24) expressa o modelo matemático para cálculo da incerteza padrão combinada relativa a E_0 .

$$u(E_0) = \overline{E_0} + \Delta R_{Ins} + \Delta Ic_{Ins} \quad (3.24)$$

Na Equação (3.24), $\overline{E_0}$ é a variabilidade das leituras de E_0 ; ΔR_{Ins} é a contribuição da resolução da máquina Instron no valor da incerteza de E_0 e $\Delta I_{C_{Ins}}$ consiste na contribuição da incerteza da calibração do sistema de medição no valor da incerteza de E_0 . Para calcular a incerteza associada a $\overline{E_0}$, a seguinte expressão é utilizada (Eq. 3.25).

$$u(\overline{E_0}) = \frac{sE_0}{\sqrt{5}} \quad (3.25)$$

Na Equação (3.16), sE_0 consiste no desvio padrão dos cinco valores de módulo de elasticidade coletados por meio da máquina de ensaio de tração Instron. As Equações (3.26) e (3.27) permitem calcular as incertezas padrão de ΔR_{Ins} e ΔI_{Ins} , respectivamente.

$$u(\Delta R_{Ins}) = \frac{R_{Ins}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (3.26)$$

$$u(\Delta I_{Ins}) = \frac{I_{Ins}}{k_{Ins}} \quad (3.27)$$

Na Equação (3.26), R_{Ins} consiste na resolução da máquina Instron. Na Equação (3.27), I_{Ins} é a incerteza relacionada à calibração do equipamento. k_{cc} é o fator de abrangência para o cálculo da incerteza expandida da calibração. As incertezas acima são do tipo B, sendo que a incerteza associada à resolução da máquina Instron apresenta distribuição de probabilidade retangular e a incerteza associada à calibração da máquina apresentando distribuição de probabilidade normal.

Após uma análise minuciosa da metodologia proposta por Lee et al. (2006) é possível concluir que há 10 mensurandos, 17 variáveis de entrada e 4 sistemas de medição (LVDT, célula de carga, MEV e equipamento de ensaio de tração), como mostra a Fig. 3.2.

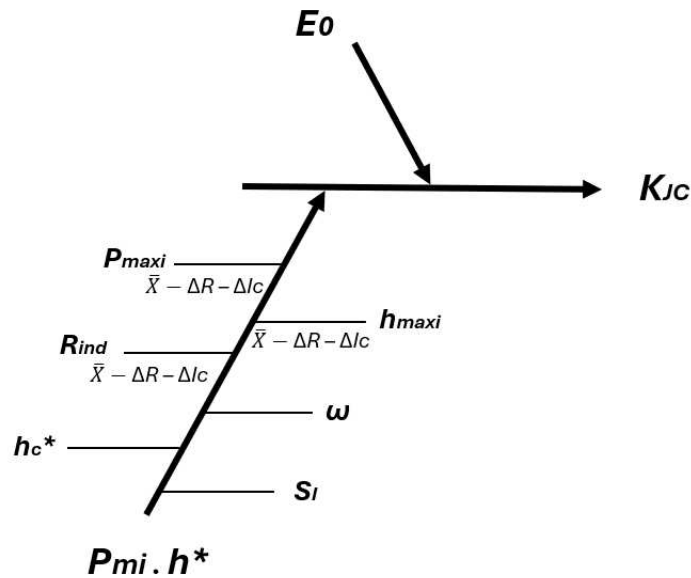


Figura 3.2 – Diagrama de Ishikawa contendo os parâmetros requeridos para a estimativa de K_{IC} de acordo com a metodologia de Lee et al. (2006). Fonte: Próprio autor.

3.3. Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a)

Com o intuito de se estimar a incerteza relacionada à tenacidade à fratura obtida por meio da aplicação da metodologia proposta por Zhang, Wang e Wang (2019a), cada um dos mensurandos listados (P_{maxi} , h_{maxi} , h_{pi} , S_I , R_{ind} , E_0 , v_{ind} , E_{ind} , v e α) foi tratado separadamente e sua incerteza padrão foi estimada. O método de Monte Carlo foi aplicado para determinar as incertezas de U_{Di} , A_{eqi} , K_{IIC} e K_{IC} . Para todas as outras variáveis, foi utilizado o método GUM.

O valor de U_{Di} é obtido pela Eq. (3.28) e o de A_{eqi} , pela Eq. (3.29).

$$U_{Di} = \frac{1}{2} \cdot P_{maxi} \cdot \left(h_{maxi} - h_{pi} - \frac{P_{maxi}}{2 \cdot \sqrt{\frac{(h_{maxi} - h_{pi}) \cdot R_{ind} \cdot \left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right)}{\left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right) - R_{ind}}} - \frac{(1 - v^2)}{E_0} + \frac{(1 - v_{ind}^2)}{E_{ind}} \right) \quad (3.28)$$

$$A_{eqi} = \pi \cdot \frac{(h_{maxi} - h_{pi}) R_{ind} \left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right)}{\left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right) - R_{ind}} \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{(1 - v^2)}{2 \cdot \sqrt{\frac{(h_{maxi} - h_{pi}) \cdot R_{ind} \cdot \left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right)}{\left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right) - R_{ind}}} - \frac{(1 - v_{ind}^2)}{E_{ind}} \right)}{S_i E_0} \right] \quad (3.29)$$

As Figuras 3.3 e 3.4 contêm os diagramas de Ishikawa com todas as variáveis de entrada e os mensurandos considerados para a determinação da taxa de liberação de energia J_{SIT} e da tenacidade à fratura K_{IC} .

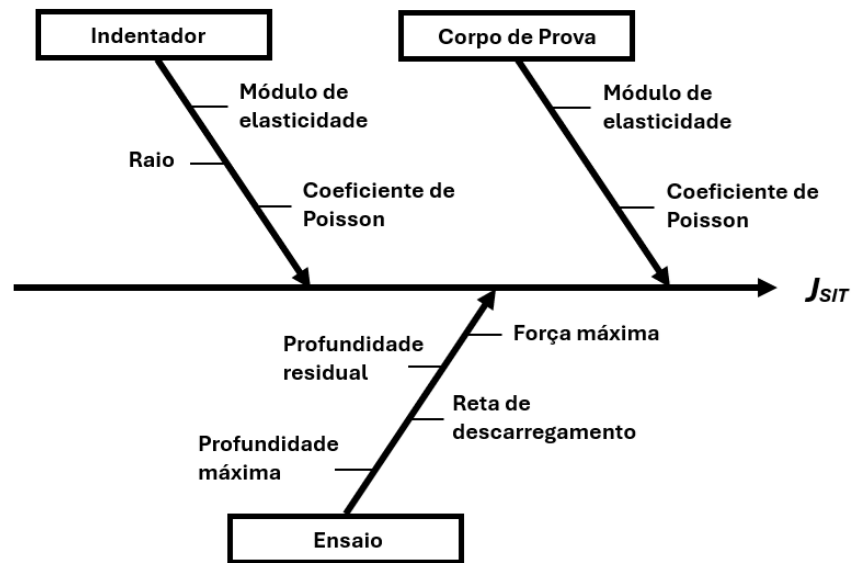


Figura 3.3 – Diagrama de Ishikawa contendo os parâmetros requeridos para a estimativa de J_{SIT} de acordo com a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a). Fonte: Próprio autor.

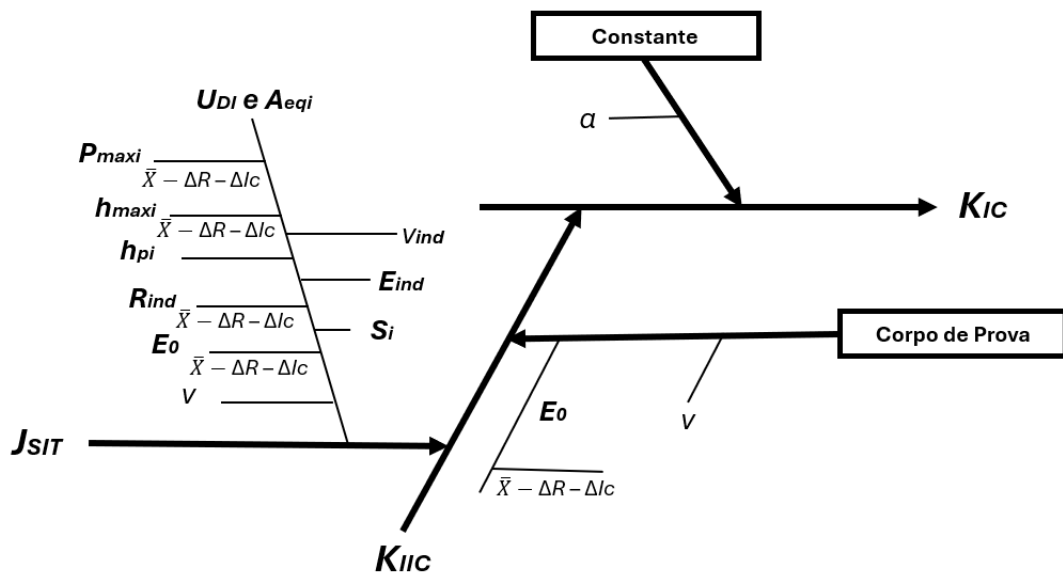


Figura 3.4 – Diagrama de Ishikawa contendo todos os parâmetros requeridos para a estimativa de K_{IC} de acordo com a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a). Fonte: Próprio autor.

Pela análise das Fig. (3.3) e (3.4), observa-se que o número de mensurandos é igual a 14, com 31 variáveis de entrada e 4 sistemas de medição. O número de variáveis de entrada e mensurandos é maior quando comparado com a metodologia de Lee et al. (2006).

O fator de intensidade de tensão crítica sob carregamento de Modo II é calculado conforme a Eq. (3.30). Em seguida, estima-se a tenacidade à fratura K_{IC} , de acordo com a Eq. (3.31).

$$K_{IIC} = \sqrt{\frac{E_0}{1-\nu^2} \cdot J_{SIT}} \quad (3.30)$$

$$K_{IC} = \frac{K_{IIC}}{\alpha} \quad (3.31)$$

A seguir, é detalhada a metodologia adotada para cálculo da incerteza padrão de todas as variáveis e mensurandos apresentados.

3.3.1. Cálculo das incertezas padrão associadas a P_{maxi} , h_{maxi} , S_i , R_{ind} e E_0

As incertezas padrão de P_{maxi} , h_{maxi} , S_i , R_{ind} e E_0 , ν_{ind} , E_{ind} e ν são estimadas da mesma forma que para a metodologia de Lee et al. (2006).

3.3.2. Cálculo da incerteza associada a h_{pi}

A variável h_{pi} consiste na profundidade de indentação residual e é associada aos coeficientes linear e angular da reta de descarregamento de cada ciclo de indentação, sendo ela o valor de h considerando a força igual a 0 em cada ciclo de descarregamento. Como existe um único coeficiente linear e um único coeficiente angular por ciclo, a incerteza padrão de h_{pi} é classificada como do tipo B, com distribuição de probabilidade retangular. A Equação (3.32) apresenta a forma de cálculo da incerteza padrão relacionada a h_{pi} .

$$u(h_{pi}) = \frac{0,0001 \cdot h_{pi}}{\sqrt{3}} \quad (3.32)$$

3.3.3. Cálculo da incerteza associada a α

Por fim, a constante α (razão entre a tensão crítica de cisalhamento e a tensão crítica normal) tem sua incerteza estimada por meio da equação da distribuição retangular. Seu valor é igual a 0,35, pois também foi utilizado desta forma por Zhang, Wang e Wang (2019a) e pelo fato deste ser o valor comumente aplicado para ligas de aço e alumínio. Considerou-se uma

incerteza equivalente a 1 % para a razão entre a tensão crítica de cisalhamento e a tensão crítica normal, o que fez com que a Eq. (3.33) fosse multiplicada por 0,01.

$$u(\alpha) = \frac{0,01 \cdot \alpha}{\sqrt{3}} \quad (3.33)$$

3.3.4. Cálculo da incerteza associada a J_{SIT} , K_{IIC} e K_{IC}

A relação dU_{Di}/dA_{eqi} é utilizada para a obtenção da reta com os valores dos 12 ciclos de medições de U_{Di} e A_{eqi} . O valor de J_{SIT} é o coeficiente angular da reta obtida por esta relação. De maneira análoga, para o cálculo da incerteza relacionada a esta taxa de dissipação de energia estima-se o coeficiente angular das retas representadas pelas Eqs. (3.34) e (3.35).

$$\frac{d(U_{Di}-u(U_{Di}))}{d(A_{eqi})} \quad (3.34)$$

$$\frac{d(U_{Di}+u(U_{Di}))}{d(A_{eqi})} \quad (3.35)$$

É preciso ressaltar que as incertezas de U_{Di} , A_{eqi} , K_{IIC} e K_{IC} foram obtidas por meio do Método de Monte Carlo para cada um dos 12 ciclos de indentação efetuados em cada ensaio. Assim sendo, ela foi calculada de forma similar à metodologia de Lee et al. (2006).

3.4. Metodologia de Yu et al. (2023)

É válido destacar que a incerteza relacionada à tenacidade à fratura obtida pela aplicação da metodologia proposta Yu et al. (2023) foi calculada predominantemente pelo método de Monte Carlo.

3.4.1. Cálculo da incerteza associada a η

Para determinar um parâmetro do material estudado η de acordo com a lei de potência de Meyer, é necessário avaliar a curva de $P_{maxi}/4a^2$ em função de a/R_{ind} , sendo P_{maxi} a força máxima aplicada no ciclo de indentação i , a o raio de contato considerando o *pile-up/sink-in* e R_{ind} o raio do indentador. A incerteza associada a este parâmetro η engloba as incertezas de $P_{maxi}/4a^2$, conforme a Eq. (3.36).

$$u(\eta)^2 = u(P_{maxi}/4a^2)^2 \quad (3.36)$$

A incerteza padrão da força máxima de indentação P_{maxi} é calculada pelo modelo matemático proposto por meio da Eq. (3.15).

Para o cálculo da incerteza relativa à variável raio de contato considerando o *pile-up/sink-in* (a) é necessário expressar sua equação em função de todos os parâmetros possíveis de serem calculados. Assim sendo, a Eq. (3.37) apresenta a forma de cálculo desta variável.

$$a = \sqrt{\frac{5(2-n)}{2(4+n)} \left(2R_{ind} \left(h_{maxi} - \omega \frac{P_{maxi}}{S_i} \right) \right) - \left(h_{maxi} - \omega \frac{P_{maxi}}{S_i} \right)^2} \quad (3.37)$$

Na Equação (3.37), n é o expoente de endurecimento por deformação de materiais metálicos, h_{maxi} é a profundidade máxima do indentador no ciclo i , ω é uma constante de valor 0,75 para indentadores esféricos e S_i é o coeficiente angular da reta de descarregamento de cada ciclo de indentação. É preciso estimar as incertezas de todas as variáveis de influência presentes na Eq. (3.37) para determinar a incerteza de a . O modelo matemático para o cálculo da incerteza de h_{maxi} é exposto pela Eq. (3.2).

A incerteza padrão de n é do tipo B, com uma distribuição de probabilidade retangular. Foi considerado que 1 % do valor desta variável, igual a 0,1, interfere na incerteza final. Por isso, a Eq. (3.38) é multiplicada por 0,01.

$$u(n) = 0,01 \cdot \frac{n}{\sqrt{3}} \quad (3.38)$$

Da mesma forma, a incerteza padrão da constante ω , de valor, 0,75, é do tipo B com distribuição de probabilidade retangular. Também neste caso, 1 % do valor de ω interfere na incerteza final (Eq. 3.39).

$$u(\omega) = 0,01 \cdot \frac{\omega}{\sqrt{3}} \quad (3.39)$$

A incerteza padrão de S_i é calculada da mesma forma que na metodologia a Lee et al. (2006). Basta aplicar a Eq. (3.20) para estimá-la. A incerteza de R_{ind} também foi obtida

anteriormente (Eq. 3.22). Finalmente, aplica-se a Eq. (3.28) para a obtenção da incerteza de η de acordo com o Método de Monte Carlo de forma similar como efetuado para as outras duas metodologias.

3.4.2. Cálculo da incerteza associada a P_m^{cr}

Em seguida, calcula-se o valor de P_m^{cr} (máxima pressão de contato de indentação na ocorrência da máxima energia de indentação) e sua incerteza. A expressão final de P_m^{cr} é dada pela Eq. (3.40). As incertezas padrão de cada variável de influência contidas na equação citada devem ser estimadas.

$$P_m^{cr} = \beta \cdot \eta \left(n^2 \left(a_1 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right)^2 + a_2 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right) + a_3 \right) + n \left(b_1 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right)^2 + b_2 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right) + b_3 \right) \right) + \beta \cdot \eta \left(c_1 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right)^2 + c_2 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right) + c_3 \right) \quad (3.40)$$

A incerteza de β é do tipo B, com distribuição de probabilidade retangular (Eq. 3.41). Considera-se que 1 % do seu valor contribui para a incerteza de P_m^{cr} . A incerteza de n foi calculada no passo anterior e a incerteza de E_0 é a mesma que aquela calculada para o método de Lee et al. (2006). A Equação (3.15) contém o modelo matemático para a obtenção da incerteza do módulo de elasticidade E_0 .

$$u(\beta) = 0,01 \cdot \frac{\beta}{\sqrt{3}} \quad (3.41)$$

Além das variáveis já analisadas, é preciso estimar as incertezas de a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 e c_3 . Todas estas constantes têm suas incertezas obtidas de forma semelhante, uma vez que, no caso de um raio de indentador de 0,38 mm, foi necessário extraí-las de interpolações entre os valores apresentados por Yu et al. (2023) para as constantes relativas aos raios de indentador de 0,25 e 0,50 mm. Considerou-se uma incerteza equivalente a 5 % para cada uma das variáveis apresentadas (uma vez que as constantes para o raio do indentador de 0,38 mm foram obtidas por interpolação) como mostrado na Eq. (3.42), considerando uma avaliação do tipo B e distribuição de probabilidade retangular.

$$u(c) = 0,05 \cdot \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (3.42)$$

Na equação (3.42), c representa as variáveis em questão.

3.4.3. Cálculo da incerteza associada a h_c^{cr}

A profundidade de indentação crítica (h_c^{cr}) é obtida por meio do gráfico de pressão de contato (P_m) em função da profundidade de indentação (h_c). A incerteza considerada para o parâmetro h_c^{cr} é equivalente a 5 % do seu valor total, uma vez que esta variável é extraída do gráfico. Uma vez que seu valor é obtido pelo gráfico, sua incerteza pode ser calculada por meio da equação característica da distribuição de probabilidade retangular, considerando que a incerteza é do tipo B, Eq. (3.43).

$$u(h_c^{cr}) = 0,05 \cdot \frac{h_c^{cr}}{\sqrt{3}} \quad (3.43)$$

3.4.4. Cálculo da incerteza associada a $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC}

A energia crítica de indentação $J_{IC,III}$ é obtida por meio do limite da integral na Eq. (2.38). Para calcular sua incerteza, basta aplicar o método de Monte Carlo na expressão referida. De maneira análoga, aplica-se Monte Carlo para se obter a incerteza de $K_{JC,III}$ conforme a Eq. (2.39).

Já a tenacidade à fratura K_{IC} é calculada conforme a Eq. (2.10), também aplicando-se o método de Monte Carlo. A Figura 3.5 mostra a relação das variáveis até a obtenção de $J_{IC,III}$ de acordo com a metodologia de Yu et al. (2023).

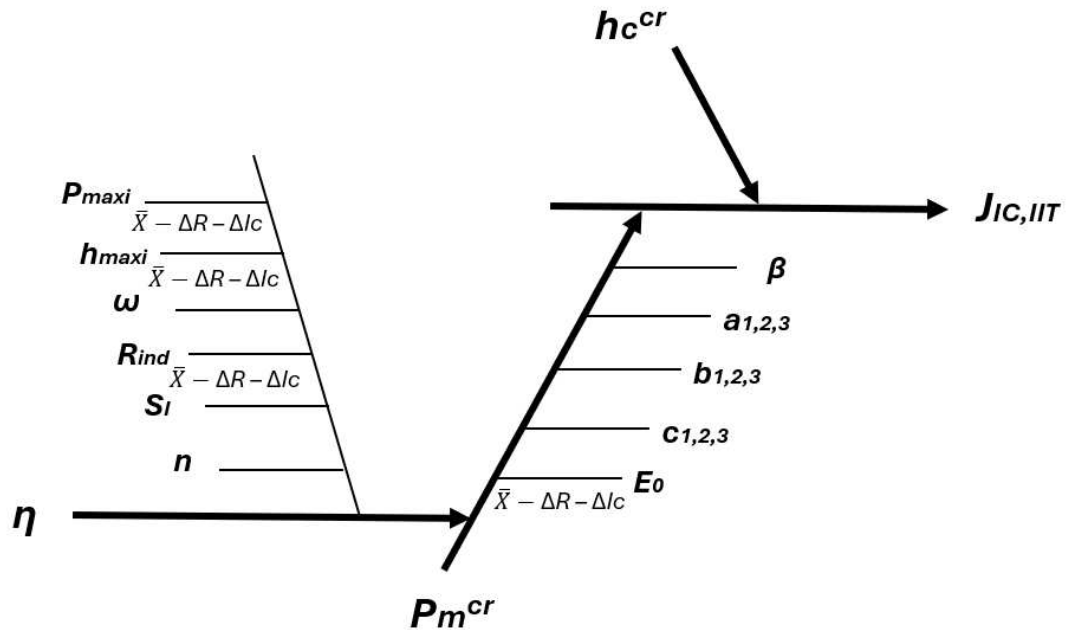


Figura 3.5 – Diagrama de Ishikawa contendo os parâmetros requeridos para a estimativa de $J_{IC,III}$ de acordo com a metodologia de Yu et al. (2023). Fonte: Próprio autor.

Pela análise da Fig. (3.5), percebe-se que existem 20 mensurandos e 32 variáveis de entrada, além de 4 sistemas de medição. Esses números são superiores aos das metodologias de Lee et al. (2006) e Zhang, Wang e Wang (2019a).

3.5. Comparação Metrológica e Estatística dos Valores de Tenacidade à Fratura Obtidos pelas Metodologias Avaliadas

É importante fazer uma comparação entre os valores de tenacidade à fratura e de incerteza de medição obtidos, com o intuito de conhecer a metodologia ou as metodologias mais adequadas para a determinação dos parâmetros de interesse dos trabalhos que se dedicam a estimar os valores de tenacidade pela técnica da indentação instrumentada.

Para analisar se há diferenças estatisticamente significativas entre os valores de tenacidade à fratura decorrentes das três metodologias avaliadas, estes foram organizados conforme a matriz de planejamento mostrada na Tabela 3.1. O fator metodologia foi investigado em quatro níveis. O quarto nível corresponde aos valores experimentais obtidos por Melo (2019) para o aço 4130 M. Este autor utilizou o método normatizado da ASTM E1820-18 (ASTM, 2018) para o cálculo de J e K_{IC} .

Tabela **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..1** – Planejamento experimental para o fator metodologia. Fonte: Próprio autor.

Experimento	Metodologia
1	Lee (2006) (-2)
2	Zhang (2019) (-1)
3	Yu (2023) (+1)
4	Melo (2019) (+2)

Vale notar que foram realizados três ensaios utilizando cada uma das metodologias. A análise estatística foi realizada aplicando os testes de Kruskal-Wallis e U de Mann-Whitney por meio do *software* Statistica. De acordo com a hipótese nula H_0 , os valores obtidos a partir das metodologias consideradas são iguais entre si para uma probabilidade de abrangência de 95 % (caso p seja menor ou igual a 0,05). Já a hipótese alternativa H_1 expressa que os valores são diferentes entre si (caso p seja maior que 0,05).

Ainda, foram estimados os valores de *skewness* (assimetria) e *kurtosis* (achatamento) dos histogramas das variáveis analisadas. Para que a distribuição dos valores seja caracterizada como normal, a assimetria deve apresentar valor próximo a 0, indicando que a distribuição é simétrica, e o achatamento deve ficar próximo de 3, indicando que a curva obedece ao padrão da distribuição normal.

Tomando como base os valores de incerteza calculados foi avaliada a qualidade dos valores de tenacidade obtidos pelas diferentes metodologias. Também foi determinada a diferença entre os valores de tenacidade obtidos pelas diferentes metodologias e aqueles encontrados por Melo (2019). Esta diferença possibilita avaliar a tendência e a exatidão. A repetibilidade para nível de confiança de 95 % também foi avaliada. Por fim foi calculado o erro máximo para cada metodologia.

3.6. Programação em MATLAB

Com o intuito de facilitar o cálculo da incerteza de medição da tenacidade à fratura via indentação instrumentada e popularizar esta tarefa, foram criados três códigos em MATLAB R2018a®. Cada código diz respeito a uma das metodologias abordadas neste trabalho.

Por meio dos algoritmos, é possível determinar as incertezas padrão combinada e expandida da tenacidade à fratura de um único ensaio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos relativos aos cálculos de incerteza efetuados para cada metodologia de estimativa da tenacidade à fratura abordada neste trabalho. Além disso, este capítulo contém as informações acerca dos valores do raio do indentador. Por fim são apresentados os resultados da comparação metrológica e estatística das metodologias avaliadas.

4.1. Resultados da Medição do Raio do Indentador

A Tabela 4.1 contém os três valores de raio do indentador coletados nas medições efetuadas com o MEV, bem como a média e desvio padrão associado para nível de confiança de 68,27 %. Ainda, a Fig. 4.1 mostra uma imagem da medição do raio do indentador efetuada com MEV.

Tabela 4.1 – Valores do raio do indentador medido com MEV e da média e do desvio padrão dos dados coletados. Fonte: Próprio autor.

Valores [mm]	
Medição 1	0,3824
Medição 2	0,3824
Medição 3	0,3853
Média	0,3834
Desvio Padrão	0,0017

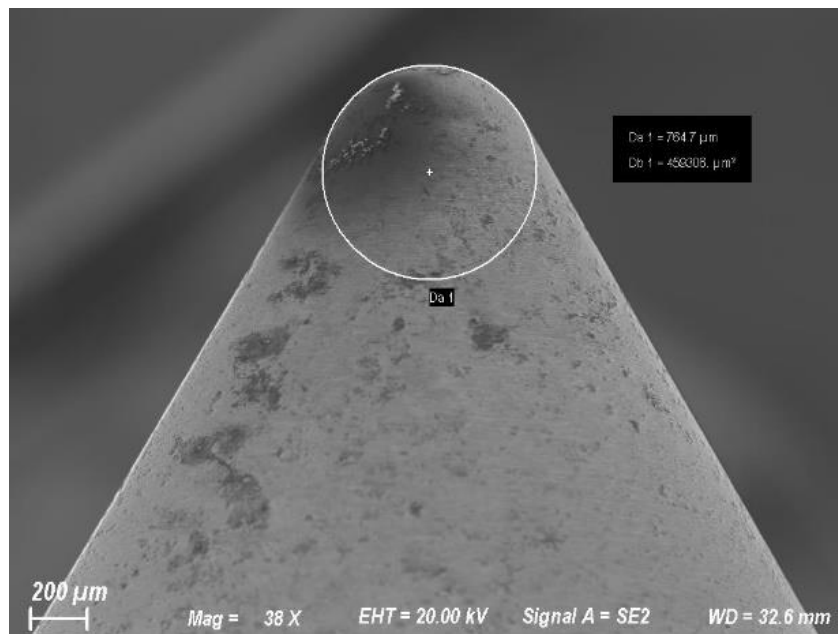


Figura 4.1 – Imagem obtida durante a medição do raio do indentador com o Microscópio Eletrônico de Varredura. Fonte: Próprio autor.

A partir das medições efetuadas, tem-se que o raio do indentador é de 0,3834 mm, sendo que a incerteza padrão combinada estimada foi de 0,0010 mm. É importante destacar que a medição com MEV apresenta dificuldades como o posicionamento adequado do objeto a ser medido. Mesmo assim, o valor do raio obtido nesta medição foi bem próximo do valor nominal do raio do indentador, que é igual a 0,38 mm.

4.2 Resultados da Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura para a Metodologia de Lee et al. (2006)

Os valores das variáveis utilizadas pela metodologia proposta por Lee et al. (2006), bem como os valores de incerteza são apresentados a seguir.

4.2.1. Valores das variáveis e das incertezas padrão

A Tabela 4.2 contém os valores obtidos para as variáveis e as respectivas incertezas padrão considerando o ciclo 4 do primeiro ensaio efetuado. Este ciclo foi selecionado para ter os valores considerados no cálculo da tenacidade à fratura devido ao fato de o gráfico de $\ln(h_c)$ e $\ln(E_D)$ indicarem um valor de h_c^* próximo ao do ciclo 4 de indentação. Este gráfico é apresentado na Fig. 4.2.

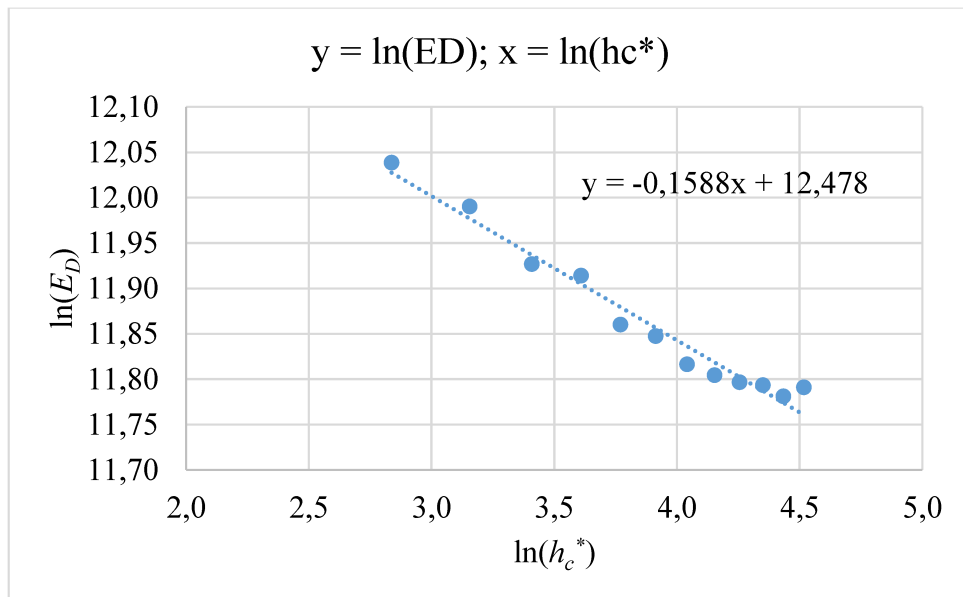


Figura 4.2 – Gráfico de $\ln(E_D)$ em função de $\ln(h_c^*)$. Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.2 – Valores das variáveis e de suas incertezas padrão relativas ao ciclo 4 do ensaio 1 da metodologia de Lee et al. (2006). Fonte: Próprio autor.

Variáveis	Valores	Incerteza padrão
R_{ind}	0,38333 mm	0,00099 mm
S_i	44 226,15 N/mm	2,55 N/mm
ν	0,3	0,017
E	210 241,67 MPa	480,21 MPa
ν_{ind}	0,23	0,013
E_{ind}	710 000 MPa	532,89 MPa
f^*	0,11	0,00063
n	0,1	0,00058
h_{maxi}	0,042 mm	0,00004 mm
ω	0,75	0,004
P_{maxi}	310,95 N	0,263 N

Já a Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos para a tenacidade à fratura K_{JC} considerando os três ensaios efetuados neste trabalho, para o material 4130 M.

Tabela 4.3 – Valores de K_{JC} referentes aos três ensaios realizados utilizando a metodologia de Lee et al. (2006). Fonte: Próprio autor.

Ensaio	K_{JC} [MPa.m ^{0.5}]
1	163,29
2	164,24
3	172,20
Média	166,58
Desvio Padrão (nível de confiança de 68,27 %)	3,75

A partir da Tabela 4.3 se conclui que os valores de tenacidade decorrentes da aplicação da metodologia de Lee et al. (2006) apresentam uma elevada repetibilidade.

4.2.2. Valores das incertezas padrão combinadas e da incerteza expandida da tenacidade à fratura

A metodologia de Lee et al. (2006) pode ser resumida à multiplicação da profundidade h_c^* e da pressão P_{mi} . Obtidos estes parâmetros por meio das equações apresentadas no Capítulo III, é possível calcular a tenacidade à fratura, conforme explicitado na seção anterior, e suas incertezas padrão combinada e expandida. A Tabela 4.4 contém os valores das incertezas padrão combinada das variáveis mencionadas para o primeiro ensaio efetuado.

Tabela 4.4 – Valores das incertezas padrão combinadas das variáveis h_c^* e P_{mi} considerando o ciclo 4 do primeiro ensaio realizado. Fonte: Próprio autor.

Variável	Valor	Incerteza padrão combinada
h_c^*	0,03 mm	0,00005 mm
P_{mi}	3668,70 MPa	11,5137 MPa

A Figura (4.3) contém os histogramas dos valores simulados de h_c^* (a) e P_{mi} (b). Já a Tab. 4.5 contém os coeficientes de assimetria (*skewness*) e os coeficientes de achatamento (*kurtosis*) relativos às variáveis em questão para o ensaio 1.

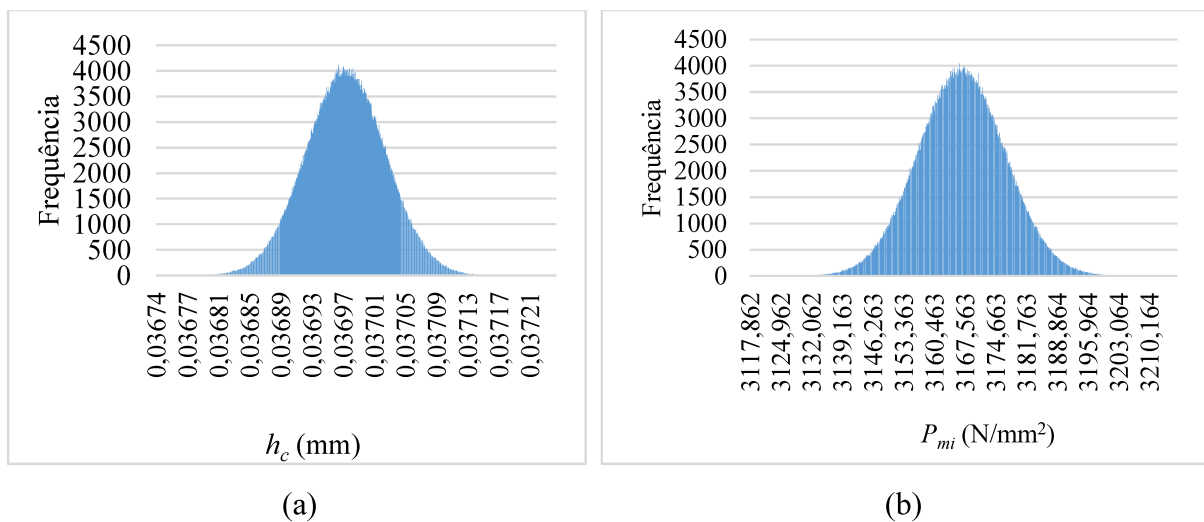


Figura 4.3 – Histogramas das variáveis h_c^* (a) e P_{mi} (b) do primeiro ensaio efetuado. Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.5 - Coeficientes de assimetria (*skewness*) e os coeficientes de achatamento (*kurtosis*) para as variáveis h_c^* e P_{mi} do ensaio 1. Fonte: Próprio autor.

	h_c^*	P_{mi}
assimetria (<i>skewness</i>)	0,00049	0,01556
achatamento (<i>kurtosis</i>)	3,00321	3,00143

A incerteza da tenacidade à fratura K_{JC} obtida via metodologia de Lee et al. (2006) foi estimada pelos métodos de Monte Carlo e do GUM combinados. O valor da incerteza padrão combinada para um único ensaio corresponde a $0,31 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$. Considerando os outros 2 ensaios, a incerteza padrão combinada é de $2,47 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, que é equivalente a 1,48 % do valor médio de K_{JC} ($166,57 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$). Já a incerteza expandida considerando os três ensaios efetuados foi de $4,94 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, que representa 2,96 % da tenacidade à fratura.

A Figura 4.4 contém os histogramas dos valores simulados de $h_c^* \cdot P_{mi}$ e também da variável estimada K_{JC} , considerando o primeiro ensaio realizado.

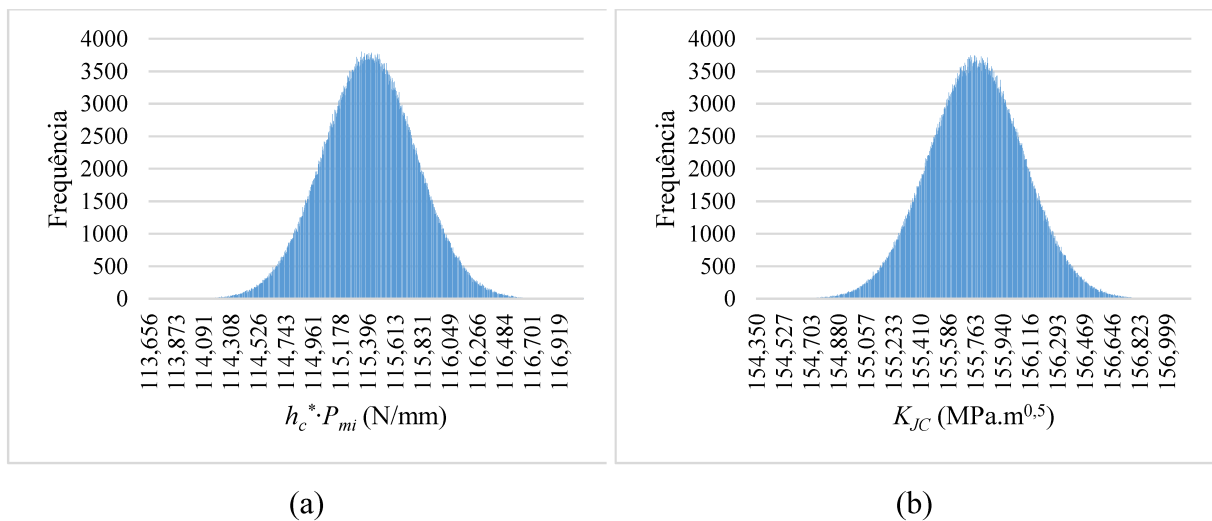


Figura 4.4 – Histogramas dos valores simulados de $h_c^* \cdot P_{mi}$ (a) e da variável K_{JC} (b) para o ensaio 1. Fonte: Próprio autor.

Já a Tab. 4.6 expressa os valores dos coeficientes de assimetria (*skewness*) e os coeficientes de achatamento (*kurtosis*) para $h_c^* \cdot P_{mi}$ e K_{JC} .

Tabela 4.6 – Valores dos coeficientes de assimetria e de achatamento de $h_c^* \cdot P_{mi}$ e K_{JC} . Fonte: Próprio autor.

	$h_c^* \cdot P_{mi}$	K_{JC}
assimetria (<i>skewness</i>)	0,00372	-0,00148
achatamento (<i>kurtosis</i>)	2,99869	3,00009

A partir dos dados analisados e dos gráficos elaborados, conclui-se que os dados apresentam comportamento normal e, portanto, a análise efetuada é válida.

4.3 Resultados da Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura para a Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a)

Os resultados relativos ao cálculo da incerteza associada à tenacidade à fratura pela metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) constam nas próximas subseções. É importante destacar que os cálculos das variáveis e incertezas foram efetuados para os 12 ciclos de indentação, o que difere este das demais metodologias apresentadas neste trabalho. Tanto para a metodologia de Lee et al. (2006) quanto para a metodologia de Yu et al. (2023) é necessário estimar a incerteza de um único ciclo.

4.3.1 Valores das variáveis

A Figura 4.5 mostra os valores de P_{maxi} , h_{maxi} , h_{pi} e S_i obtidos nos ensaios 1, 2 e 3 respectivamente.

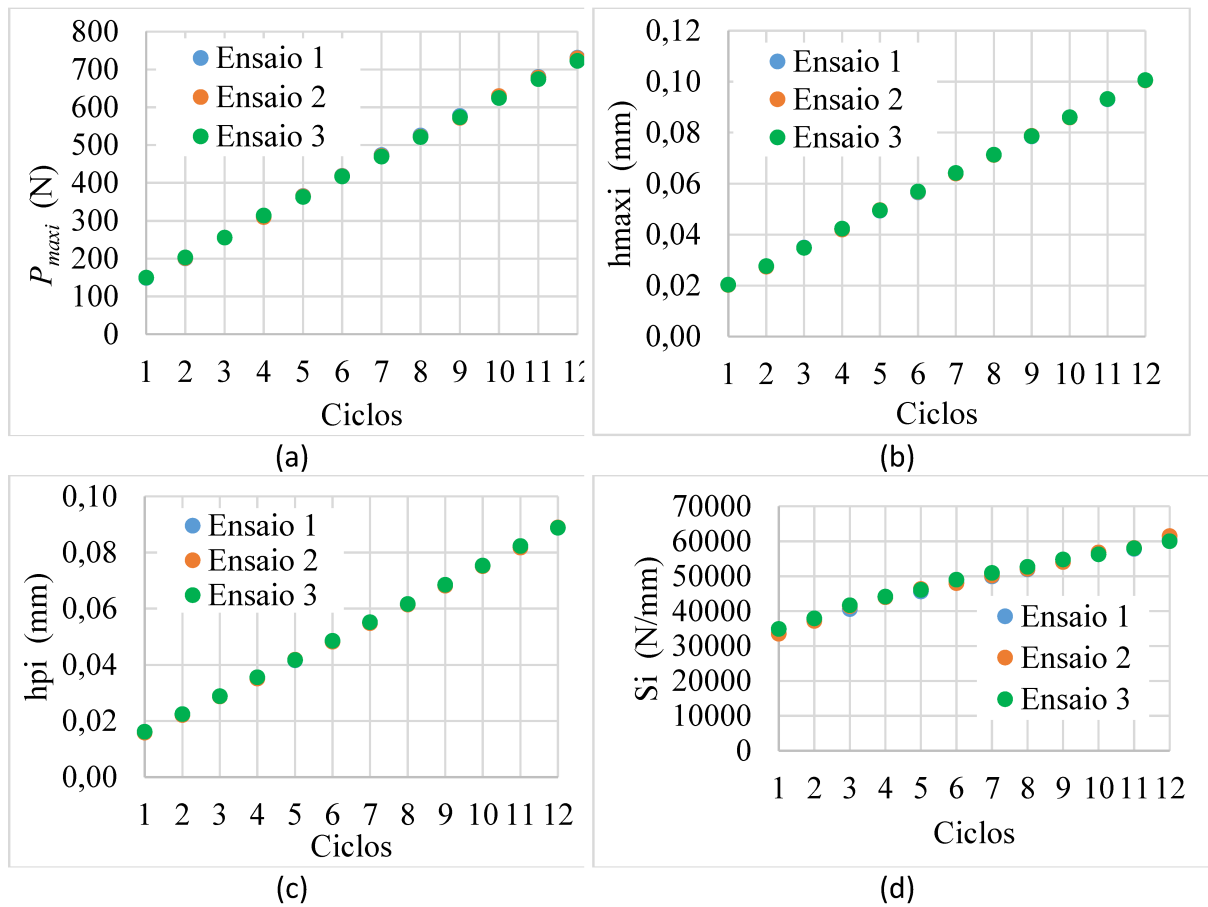


Figura 4.5 – Valores de P_{maxi} , h_{maxi} , h_{pi} e S_i obtidos em cada ciclo dos ensaios 1, 2 e 3. Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 4.5, é possível concluir que todos os parâmetros aumentam de valor com o incremento dos ciclos de 1 a 12. Esse comportamento se deve ao fato de os primeiros ciclos apresentarem menores forças e profundidades de indentação. Por esse motivo, o ciclo 12 apresenta os maiores valores de força e profundidade.

A Tabela 4.7 apresenta os valores de J_{SIT} , K_{IIC} e K_{IC} obtidos para os ensaios 1, 2 e 3 realizados sob condições de repetibilidade.

Tabela 4.7 – Valores de J_{SIT} , K_{IIC} e K_{IC} obtidos para os 3 ensaios realizados. Fonte: Próprio autor.

Ensaio	J_{SIT} [kJ.m ²]	K_{IIC} [MPa.m ^{0.5}]	K_{IC} [MPa.m ^{0.5}]
1	20,058	68,074	194,500
2	21,296	70,144	200,410
3	20,116	68,172	194,779
Média	20,490	68,797	196,562
Desvio Padrão (nível de confiança de 68,27 %)	0,699	1,167	3,335

A Tabela 4.8 mostra que os valores médios de J_{SIT} , K_{IIC} e K_{IC} são 20,490 kJ.m², 68,797 MPa.m^{0.5} e 196,562 MPa.m^{0.5}, respectivamente. O desvio padrão obtido representa 3,4 % do valor médio para J_{SIT} e 1,7 % para K_{IIC} e para a tenacidade à fratura K_{IC} . Esses resultados indicam a excelente repetibilidade dos valores destes três parâmetros.

4.3.2. Resultados dos cálculos de incerteza

Incertezas padrão associadas a P_{maxi} , h_{maxi} , h_{pi} , e S_i

As Tabelas 4.8 e 4.9 mostram as principais informações relacionadas à avaliação da incerteza associada a P_{maxi} e h_{maxi} para o ciclo 1 do primeiro dos três testes de indentação. Nessas tabelas, TA é o Tipo de avaliação, DP significa distribuição de probabilidade, GL são os graus de liberdade e CS são os coeficientes de sensibilidade. Na coluna DP, t-S significa a distribuição t-Student, R significa a distribuição retangular e N significa a distribuição normal.

Somente os resultados do primeiro ciclo de testes de indentação são mostrados em detalhes porque os cálculos para os ciclos subsequentes são realizados de maneira semelhante.

Tabela 4.8 – Principais informações relacionadas ao cálculo da incerteza associada a P_{maxi} para o ciclo 1 do primeiro ensaio de indentação. Fonte: Próprio autor.

Variável	Valor [N]	TA	DP	GL	CS	u [N]	Contribuição [%]
$\overline{P_{maxi}}$	149,113	A	t-S	14	1	0,13761	63,6
ΔR_{lc}	0,1	B	R	∞	1	0,029	2,8
$\Delta U_{c_{lc}}$	0,2	B	N	∞	1	0,100	33,6
Incerteza padrão combinada $u_c(P_{maxi})$ [N]						0,17254	
Graus de liberdade efetivos (v_{eff})						14,00	
Fator k (nível de abrangência de 95 %)						2,14	

Tabela 4.9 – Principais informações relacionadas ao cálculo da incerteza associada a h_{maxi} para o ciclo 1 do primeiro ensaio de indentação. Fonte: Próprio autor.

Variável	Valor [mm]	TA	DP	GL	CS	u [mm]	Contribuição [%]
$\overline{h_{maxi}}$	0,02039	A	t-S	14	1	0,00002	29,8
ΔR_{LVDT}	0,0001	B	R	∞	1	0,00003	37,6
$\Delta U_{c_{LVDT}}$	0,00005	B	N	∞	1	0,00002	32,6
Incerteza padrão combinada $u_c(P_{maxi})$ [mm]						0,00004	
Graus de liberdade efetivos (v_{eff})						200,34	
Fator k (nível de abrangência de 95 %)						1,96	

Analisando a Tab. 4.8, pode-se perceber que a variabilidade dos valores de P_{maxi} foi a variável que mais contribuiu para a incerteza padrão combinada, com 99,1 %. Por outro lado, para h_{maxi} , a variabilidade dos valores de h_{maxi} contribuiu com 29,8 % para a incerteza combinada, a resolução com 37,6 % e a incerteza associada à calibração do LVDT com 32,6 %.

A Figura 4.6 mostra os valores combinados de incerteza padrão associados a P_{maxi} e h_{maxi} em relação aos 12 ciclos de indentação realizados durante o ensaio 1. Na Figura 3.8(a), pode-se destacar que não há uma tendência definida nos valores de $u(P_{maxi})$. A maior de todas as incertezas padrão combinadas foi observada para o ciclo 12, equivalente a 0,39 N. Em todos os ciclos, a incerteza padrão combinada representa menos de 0,1 % do valor médio de P_{maxi} e pode ser considerada adequada para o nível de precisão exigido nesta aplicação.

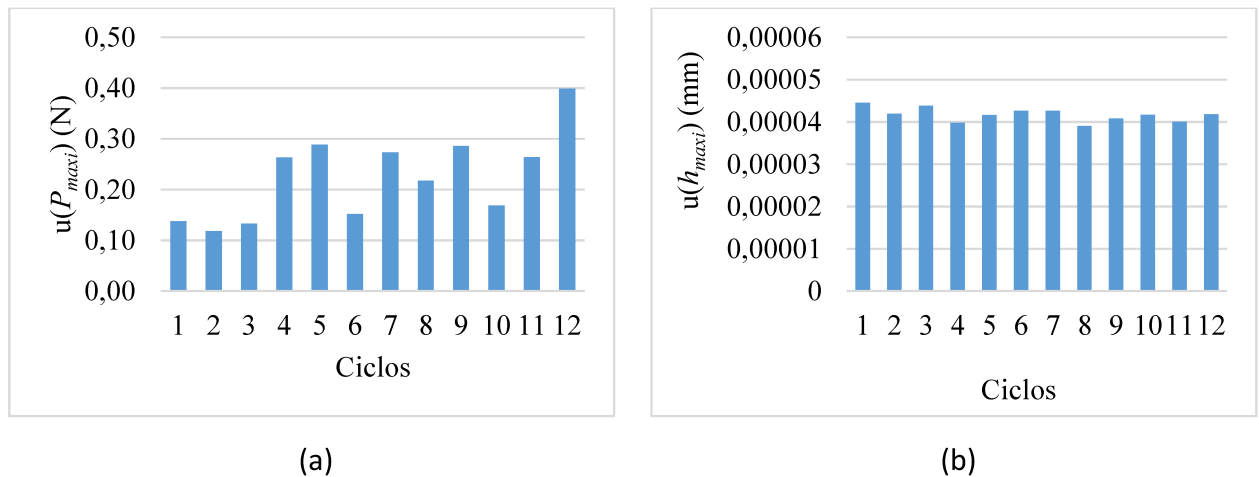


Figure 4.6 – Valores de incerteza padrão associados a P_{maxi} e (a) e h_{maxi} (b) relativos aos 12 ciclos de indentação realizados no ensaio 1. Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.7 mostra os valores de incerteza padrão associados a h_{pi} e S_i para todos os ciclos de indentação realizados durante o ensaio 1. Na Figura 3.9(a), observa-se que, para ambas as variáveis, a incerteza padrão aumenta gradualmente à medida que os ciclos de indentação aumentam do primeiro ciclo até o décimo segundo ciclo.

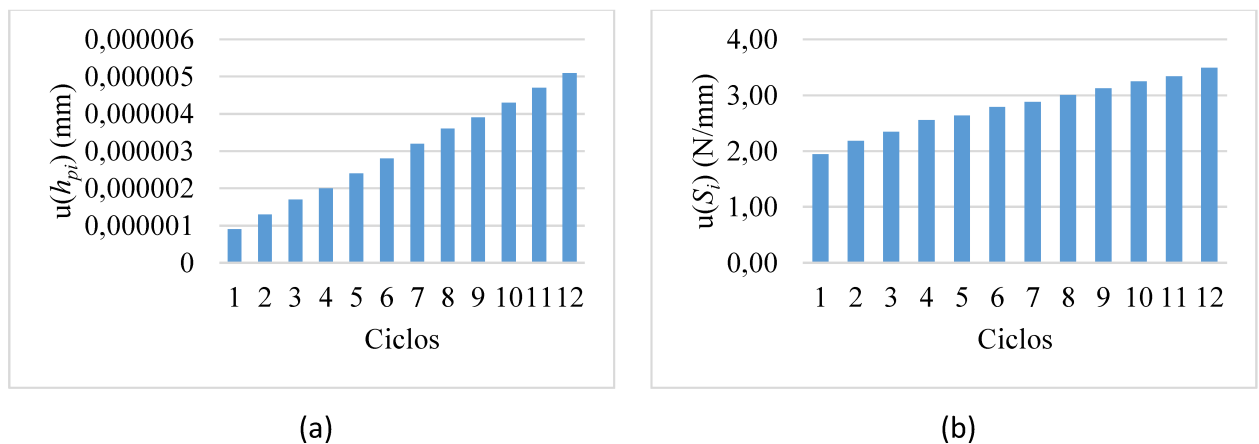


Figure 4.7 – Valores de incerteza padrão associados a h_{pi} (a) and S_i (b) relativos aos 12 ciclos de indentação realizados no ensaio 1. Fonte: Próprio autor.

Valores de incerteza associados a R_{ind} , E_0 , v_{ind} , E_{ind} , v e α que são constantes para todos os ciclos de indentação

As Tabelas 4.10 e 4.11 mostram os principais dados relacionados ao cálculo da incerteza padrão combinada associada a R_{ind} e E_0 , respectivamente.

Tabela 4.10 – Dados relativos ao cálculo da incerteza padrão combinada de R_{ind} . Fonte: Próprio autor.

Variável	Valor [mm]	TA	DP	GL	CS	u [mm]	Contribuição [%]
$\overline{R_{ind}}$	0,3834	A	t-S	2	1	0,000983	98,9
ΔR_{SEM}	0,0001	B	R	∞	1	0,000029	0,1
ΔU_{CSEM}	0,0002	B	N	∞	1	0,000100	1,0
Incerteza padrão combinada $u_c(R_{ind})$ [mm]						0,000989	
Graus de liberdade efetivos (v_{eff})						2,05	
Fator k (nível de abrangência de 95 %)						4,30	

Tabela 4.11 – Dados relativos ao cálculo da incerteza padrão combinada de E_0 . Fonte: Próprio autor.

Variável	Valor [MPa]	TA	DP	GL	CS	u [MPa]	Contribuição [%]
$\overline{E_0}$	210 241,66	A	t-S	4	1	460,36	77,1
ΔR_{Ins}	0,1	B	R	∞	1	0,03	0,1
ΔU_{CIns}	273,31	B	N	∞	1	136,66	22,8
Combined standard uncertainty $u_c(E_0)$ [MPa]						480,21	
Effective degrees of freedom (v_{eff})						4,74	
Factor k (coverage level of 95 %)						2,81	

Para o raio do indentador, medido com o Microscópio Eletrônico de Varredura, o componente que apresentou a maior contribuição foi a variabilidade das leituras. As outras duas variáveis não foram significativas. Por outro lado, para o módulo de elasticidade do material avaliado, o fator com maior contribuição para a incerteza final foi aquele associado à variabilidade das leituras (77,1 % de contribuição). A incerteza da calibração da máquina de ensaio de tração ficou em segundo lugar com uma contribuição de 22,8 %.

As incertezas associadas a v_{ind} , E_{ind} , v e α são mostradas na Tab. 4.12. É possível constatar que as incertezas relacionadas a v_{ind} , v e α correspondem a 5,8 % dos valores dessas variáveis. Além disso, a incerteza de E_0 corresponde a 0,1 % do valor do módulo de elasticidade do aço 4130 M.

Tabela 4.12 – Incertezas padrão das variáveis v_{ind} , E_{ind} , ν e α . Fonte: Próprio autor.

Variável	Incerteza padrão u
v_{ind}	0,01328
E_{ind}	532,89 MPa
ν	0,01732
α	0,00202

Incertezas padrão combinadas associadas a J_{SI} , K_{IIC} e K_{IC} obtidas pelo método de Monte Carlo

A Figura 4.8 contém os histogramas dos valores simulados de U_{Di} , A_{eqi} , K_{IIC} e K_{IC} para o ensaio 1.

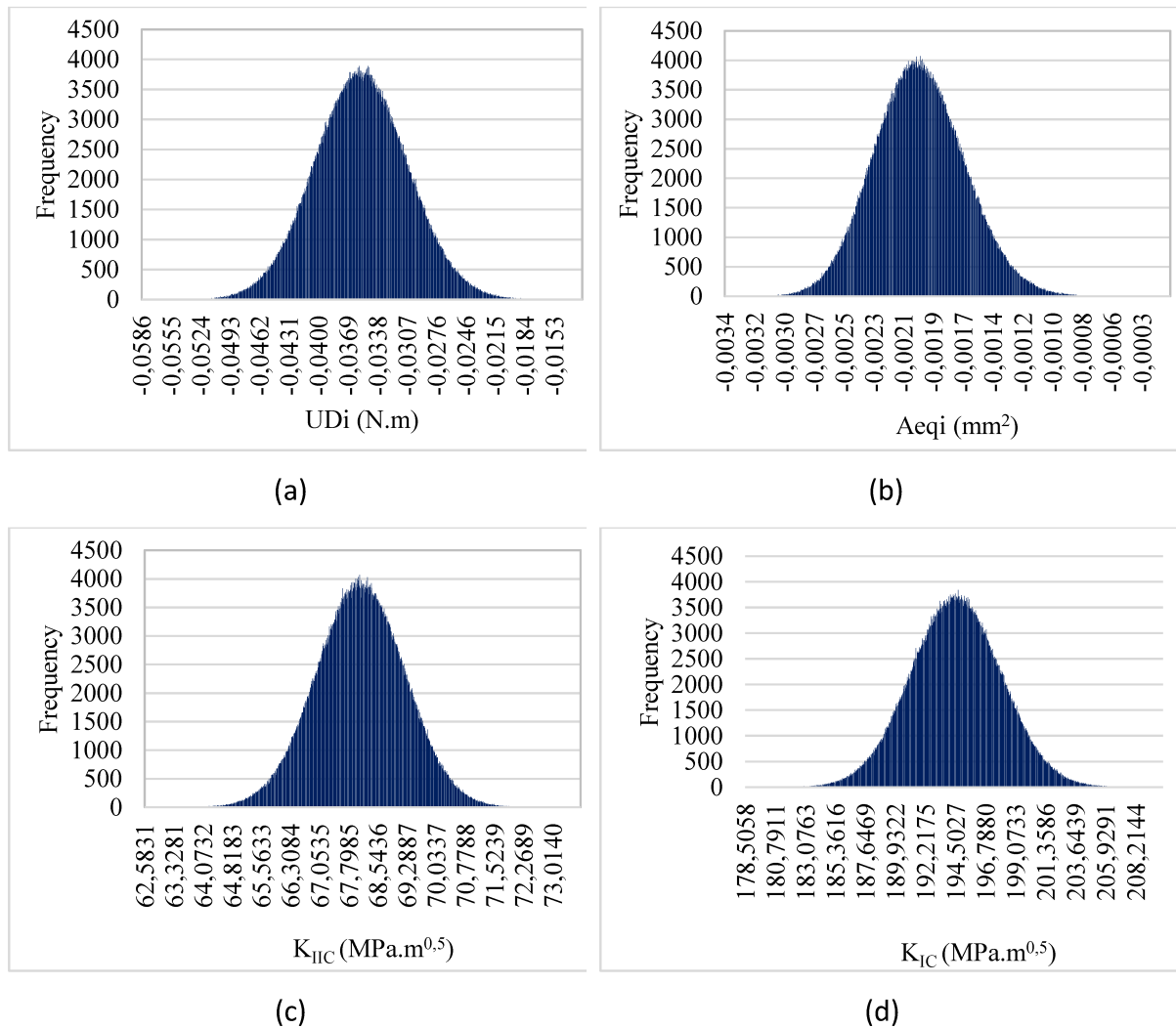


Figura 4.8 – Histogramas dos valores simulados de U_{Di} , A_{eqi} , K_{IIC} e K_{IC} para o ensaio 1. Fonte: Próprio autor.

Para avaliar a normalidade dos valores simulados, o coeficiente de assimetria (*skewness*) e o coeficiente de achatamento (*kurtosis*) foram calculados. Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 4.13. A partir desta tabela, pode-se concluir que os valores de U_{Di} , A_{eqi} , K_{IIC} e K_{IC} obtidos via simulações de Monte Carlo são normais.

Tabela 4.13 – Assimetria (*skewness*) e achatamento (*kurtosis*) dos valores simulados para a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a). Fonte: Próprio autor.

	U_{Di}	A_{eqi}	K_{IIC}	K_{IC}
assimetria				
(<i>skewness</i>)	0,03615	0,14712	-0,01926	0,01244
achatamento				
(<i>kurtosis</i>)	3,01765	3,03819	3,01261	2,99864

A Figura 4.9(a) mostra os valores de incerteza padrão associada a U_{Di} e A_{eqi} . A relação entre a incerteza associada a U_{Di} e A_{eqi} é exibida na Fig. 4.9(b). A partir do gráfico desta figura, é observado que a incerteza padrão associada a U_{Di} é de uma ordem de magnitude maior que a incerteza de A_{eqi} . Este fato indica que a variável U_{Di} exerce uma contribuição dominante na incerteza associada à tenacidade à fratura.

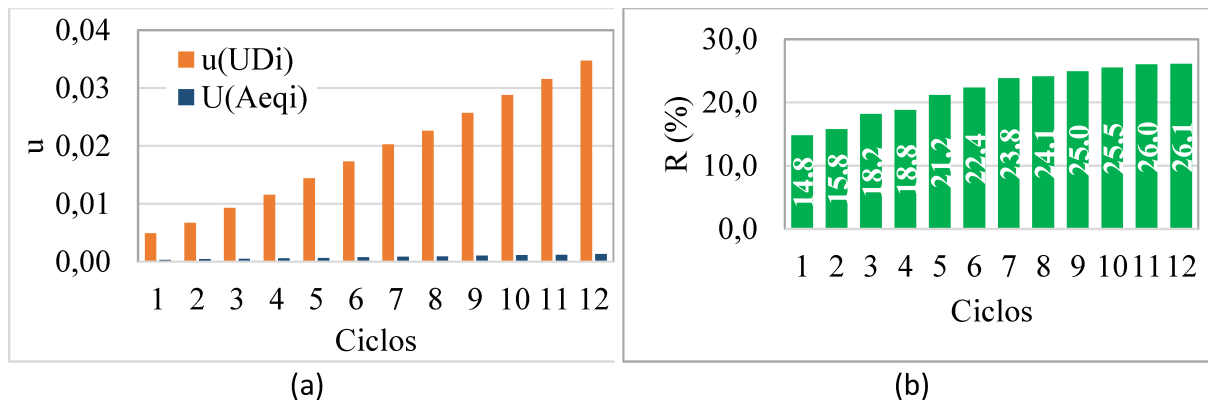


Figura 4.9 – (a) Incertezas padrão relacionadas a U_{Di} e A_{eqi} e (b) relação entre as incertezas de U_{Di} e A_{eqi} . Fonte: Próprio autor.

Aplica-se a lei de propagação de incerteza para combinar as incertezas associadas a ambas as variáveis em questão. Calculando a contribuição de cada variável na incerteza de J_{SIT} é observado que a variável U_{Di} contribui com pelo menos 99 % para a incerteza final para todos os ciclos.

A Figura 4.10 mostra os valores de U_{Di} e A_{eqi} . O coeficiente angular da reta ajustada é igual a J_{SIT} (20,058 KJ.m²) para o ensaio 1.

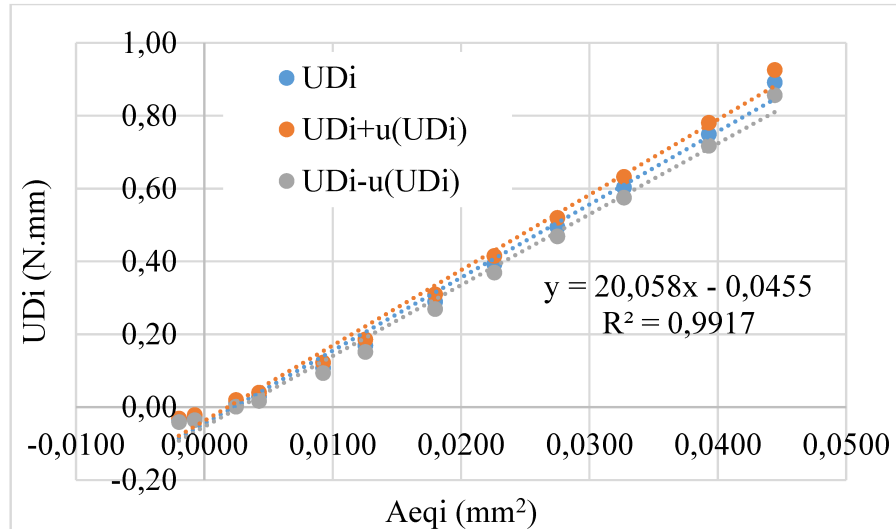


Figura 4.10 – Retas ajustadas por meio dos pontos obtidos (U_{Di} x A_{eqi}) no ensaio 1. Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.12 também mostra as retas de U_{Di} em função de A_{eqi} subtraindo e somando os valores de incerteza padrão combinada. As equações de reta obtidas, bem como os coeficientes de correlação e os coeficientes angulares são exibidos na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Equações, coeficientes de correlação e coeficientes angulares das três retas ajustadas. Fonte: Próprio autor.

	Equações das retas	R^2	J_{SIT}
U_{Di}	$U_{Di} = 20,058A_{eqi} - 0,0455$	0,9961	20,058
$U_{Di} - u(U_{Di})$	$U_{Di} = 19,435A_{eqi} - 0,0536$	0,9965	19,435
$U_{Di} + u(U_{Di})$	$U_{Di} = 20,682A_{eqi} - 0,0374$	0,9956	20,682

Assume-se que a diferença entre os coeficientes angulares de J_{SIT} U_{Di} em relação a J_{SIT} $U_{Di}-u(U_{Di})$ e J_{SIT} $U_{Di}+u(U_{Di})$ representa a incerteza padrão combinada associada a J_{SIT} , sendo igual a 0,624 kJ.m². Portanto, a incerteza expandida para um nível de abrangência de 95,45 % e fator $k = 2,00$ é 1,248 kJ.m², que representa 6,2 % do valor total de J_{SIT} , considerando um único teste. Este resultado indica a excelente qualidade dos valores de tenacidade à fratura relacionados ao primeiro ensaio.

Para avaliar a incerteza padrão combinada associada a J_{SIT} considerando os três ensaios realizados ($J_{SIT\ Total}$), a Eq. (4.2) é utilizada. Esta equação combina a incerteza padrão combinada associada a J_{SIT} obtida em um único ensaio ($u(J_{SIT})$) e a incerteza associada à variabilidade dos valores de J_{SIT} nos três ensaios ($u(VarJ_{SIT})$)

$$u(J_{SIT\ Total})^2 = u(J_{SIT})^2 + u(VarJ_{SIT})^2 \quad (4.2)$$

A incerteza padrão $u(VarJ_{SIT})$ foi avaliada como uma incerteza Tipo A considerando uma distribuição t-Student com dois graus de liberdade. O valor resultante $u(J_{SIT\ TOTAL})$ é 0,743 kJ.m² e $U(J_{SIT\ Total})$ foi 1,486 kJ.m² para um nível de abrangência de 95,45 % com fator $k = 2,00$.

Os valores de K_{IIC} e K_{IC} foram então calculados considerando os valores obtidos para J_{SIT} nos três ensaios. O método de Monte Carlo foi aplicado e os valores de incerteza foram estimados. A Tabela 4.15 mostra os valores desses parâmetros e as respectivas incertezas.

Tabela 4.15 – Valores de K_{IIC} and K_{IC} com as respectivas incertezas padrão combinada e expandida considerando os 3 ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.

	Valores [MPa.m ^{0,5}]	u [MPa.m ^{0,5}]	U [MPa.m ^{0,5}]
K_{IIC}	68,797	1,255	2,511
K_{IC}	196,562	3,760	7,520

A incerteza expandida associada ao K_{IIC} e K_{IC} corresponde a 3,6 % e 3,8 %, respectivamente, dos valores médios de K_{IIC} e K_{IC} . Esses resultados são considerados aceitáveis e demonstram que a metodologia proposta por Zhang, Wang e Wang (2019a), bem como os sistemas de medição e todos os equipamentos utilizados neste trabalho, são adequados para sua aplicação.

4.4. Resultados da Avaliação da Incerteza Associada à Tenacidade à Fratura para a Metodologia de Yu et al. (2023)

4.4.1. Valores das variáveis

Nesta seção, são apresentados os resultados relativos ao cálculo da incerteza associada tenacidade à fratura pela metodologia de Yu et al. (2023).

A Tabela 4.16 contém os valores obtidos para as variáveis nos três ensaios.

Tabela 4.16 – Valores das variáveis calculadas relativos aos três ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.

Variável	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
$A(E/\sigma_y)$	92,522	90,317	99,440
$B(E/\sigma_y)$	-7,265	-6,802	-8,728
$C(E/\sigma_y)$	3,794	3,757	3,909
P_m^{cr} / σ_y	3,993	3,980	4,031
P_m^{cr}	2351,634 MPa	2414,092 MPa	2174,385 MPa
h_{cr}	0,011 mm	0,012 mm	0,011 mm

A Tabela 4.17 apresenta os valores de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} para os três ensaios efetuados.

Tabela 4.17 – Valores de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} para os três ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.

Ensaio	$J_{IC,III}$ [kJ·m ²]	$K_{JC,III}$ [MPa·m ^{0,5}]	K_{IC} [MPa·m ^{0,5}]
1	25,216	76,327	218,078
2	28,640	81,344	232,412
3	23,716	74,022	211,490
Média	25,857	77,231	220,660
Desvio padrão (68,27 %)	2,524	3,744	10,697

Pela Tabela 4.3 é possível visualizar que a média dos valores de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} são 25,857 kJ·m², 77,231 MPa·m^{0,5} e 220,660 MPa·m^{0,5} respectivamente. Ainda, pela análise do desvio padrão de cada variável, percebe-se que ele representa 9,8 % de $J_{IC,III}$ e 4,8 % de $K_{JC,III}$ e K_{IC} .

4.4.2. Incertezas das variáveis envolvidas no cálculo de tenacidade à fratura

A maior parte das variáveis envolvidas no cálculo de incerteza da metodologia de Yu et al. (2023) tem sua incerteza estimada pelo método de Monte Carlo. Isso se deve à relativa complexidade das equações utilizadas para obtenção de cada parâmetro.

Inicialmente, estima-se a incerteza de η ., conforme mostrado na Tab. 4.4. São estimadas as incertezas de cada variável de influência desta equação e os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Incertezas padrão das variáveis relacionadas a η . Fonte: Próprio autor.

Variável	Valor	Incerteza padrão (68,27 %)
F_{maxi}	729,846 N	0,3986 N
R_{ind}	0,3833 mm	0,00099 mm
h_{maxi}	0,1009 mm	0,000042 mm
ω	0,75	0,0043
S_i	60469,393	3,491
n	0,1	0,00058

Tabela 4.19 – Valor de incerteza relacionado a η . Fonte: Próprio autor.

Variável	Valor	Incerteza padrão combinada
η	2577,645	7,846

Para a estimativa da incerteza de P_m^{cr} , outras variáveis também devem ser analisadas. A Tabela 4.20 contém os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 e c_3 para um raio de indentador de 0,38 mm com suas respectivas incertezas padrão.

Também é necessário conhecer a incerteza de β , além de n , η e E_0 , que já foram estimadas, para calcular a incerteza de P_m^{cr} . A Tabela 4.21 contém estas informações.

Com os valores das Tabelas 4.5 e 4.6, é possível calcular, pelo método de Monte Carlo, a incerteza padrão combinada de P_m^{cr} e a incerteza de h^{cr} . Estes valores estão indicados na Tabela 4.22.

Tabela 4.20 – Valores dos coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 , c_1 , c_2 e c_3 e suas incertezas padrão.

Fonte: Próprio autor.

Coeficientes	Valores	Incertezas Padrão (68,27 %)
a_1	-0,00006	0,000002
a_2	0,259	0,007
a_3	8,186	0,236
b_1	0,000005	0,0000002
b_2	-0,049	0,001
b_3	9,422	0,272
c_1	-0,0000008	0,00000002
c_2	0,004	0,0001
c_3	2,431	0,070

Tabela 4.21 – Valores e incertezas padrão de β , n , η e E_0 para a estimativa da incerteza de P_m^{cr} .

Fonte: Próprio autor.

Variáveis	Valores	Incertezas padrão
β	0,228	0,001
n	0,100	0,00057
η	2577,645	7,846
E_0	210246,60	480,213

Tabela 4.22 – Valores de P_m^{cr} e h^{cr} com sus respectivas incertezas padrão. Fonte: Próprio autor.

Variáveis	Valores	Incertezas padrão
P_m^{cr}	2351,612 MPa	62,605 MPa
h^{cr}	0,011 mm	0,0003 mm

Por fim, calcula-se as incertezas de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} pelo método de Monte Carlo. A Tabela 4.23 apresenta os valores de incerteza obtidos para estas variáveis.

Tabela 4.23 – Valores e incertezas de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} para o primeiro ensaio efetuado. Fonte: Próprio autor.

Variáveis	Valores	Incertezas padrão combinadas
$J_{IC,III}$	25,216 kJ·m ²	1,762 kJ·m ²
$K_{JC,III}$	76,327 MPa·m ^{0,5}	2,710 MPa·m ^{0,5}
K_{IC}	218,078 MPa·m ^{0,5}	7,846 MPa·m ^{0,5}

A incerteza padrão combinada de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} para os três ensaios é estimada por meio das Eq. (4.3), (4.4) e (4.5). As equações consideram a incerteza obtida no primeiro ensaio realizado e a variabilidade dos resultados dos três ensaios.

$$u(J_{IC,III \text{ Total}})^2 = u(J_{IC,III})^2 + u(VarJ_{IC,III})^2 \quad (4.3)$$

$$u(K_{JC,III \text{ Total}})^2 = u(K_{JC,III})^2 + u(VarK_{JC,III})^2 \quad (4.4)$$

$$u(K_{IC \text{ Total}})^2 = u(K_{IC})^2 + u(VarK_{IC})^2 \quad (4.5)$$

Nas Equações (4.1), (4.2) e (4.3) as incertezas $u(VarJ_{IC,III})$, $u(VarK_{JC,III})$ e $u(VarK_{IC})$ são do tipo A com distribuição de probabilidade t-Student e 2 graus de liberdade. A Tabela 4.24 contém os valores das incertezas calculadas.

Tabela 4.24 – Valores de incertezas padrão combinada e expandida das variáveis $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} considerando os três ensaios efetuados. Fonte: Próprio autor.

Variáveis	u	U
$J_{IC,III}$	2,287 kJ·m ²	4,573 kJ·m ²
$K_{JC,III}$	3,466 MPa·m ^{0,5}	6,932 MPa·m ^{0,5}
K_{IC}	9,985 MPa·m ^{0,5}	19,970 MPa·m ^{0,5}

Pela análise dos dados, verifica-se que as incertezas expandidas de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} representam 18,1 %, 9,1 % e 9,2 %, respectivamente, dos valores totais das variáveis no primeiro ensaio.

A Figura 4.11 contém os histogramas das variáveis $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} . Já a Tab. 4.25 apresenta os valores de *skewness* e *kurtosis* dos respectivos histogramas.

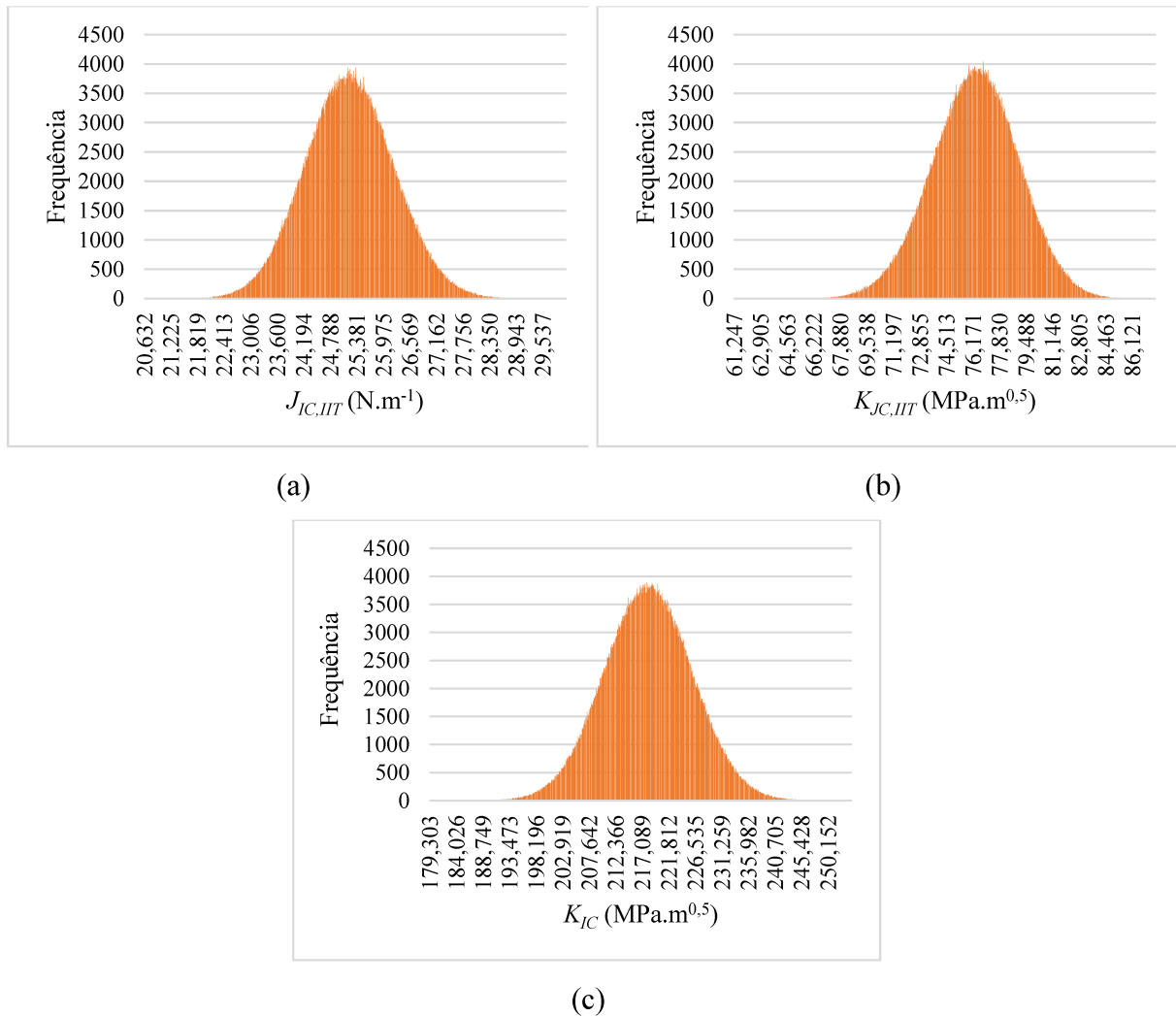


Figura 4.11 – Histogramas das variáveis $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} . Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.25 – Valores dos coeficientes de assimetria (*skewness*) e de achatamento (*kurtosis*) de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} . Fonte: Próprio autor.

	$J_{IC,III}$	$K_{JC,III}$	K_{IC}
assimetria (<i>skewness</i>)	0,05816	-0,08913	0,00368
achatamento (<i>kurtosis</i>)	3,00324	3,02382	2,99625

4.5. Comparação entre as Metodologias de Cálculo de Tenacidade à Fratura

A Tabela 4.26 mostra os valores de tenacidade à fratura e as respectivas incertezas expandidas associados (para um nível de abrangência de 95,45 %) para as três metodologias de cálculo estudadas nesta tese.

Tabela 4.26 – Tabela comparativa dos valores da tenacidade à fratura com suas respectivas incertezas expandidas e o percentual da incerteza em relação à tenacidade. Fonte: Próprio autor.

Metodologia	Tenacidade à Fratura	Incerteza Expandida	Percentual da incerteza
Lee et al. (2006)	166,57 MPa·m ^{0,5}	4,94 MPa·m ^{0,5}	2,96
Zhang, Wang e Wang (2019a)	196,56 MPa·m ^{0,5}	7,52 MPa·m ^{0,5}	3,82
Yu et al. (2023)	218,08 MPa·m ^{0,5}	19,97 MPa·m ^{0,5}	9,16

Pela análise da Tab. 4.26, é possível inferir que as três metodologias fornecem valores de tenacidade à fratura diferentes. O menor percentual de incerteza expandida corresponde à metodologia de Lee et al. (2006), com 2,96 % em relação ao valor da tenacidade à fratura de 166,57 MPa·m^{0,5}. Por outro lado, a maior incerteza foi obtida na metodologia de Yu et al. (2023), com um percentual de 9,16 % em relação à tenacidade de 218,08 MPa·m^{0,5}.

O percentual de incerteza da metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) ficou próximo do de Lee et al. (2006), sendo equivalente a 3,82 %. Em valores numéricos, a incerteza da metodologia de Lee et al. (2006) também é inferior àquelas das duas outras metodologias.

A metodologia de Lee et al. (2006) apresentou uma incerteza pouco expressiva e isto se deve ao fato de que a expressão para se obter a tenacidade à fratura é simples. Basta multiplicar a pressão P_{mi} pela profundidade h_c^* . A equação de h_c^* não é complexa e os valores das incertezas de cada termo da equação não são significativos.

Com relação à incerteza, é possível explicar o porquê do valor associado à metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) não ser o mais elevado dentre as três análises. Na referida metodologia, a incerteza padrão combinada é a incerteza associada ao coeficiente angular da reta ajustada dU_{Di}/dA_{eqi} . Neste caso, as incertezas dos 12 ciclos de A_{eqi} eram desprezíveis em relação às incertezas dos 12 pontos de U_{Di} . Isso fez com que a incerteza de U_{Di} fosse considerada para o ajuste da nova reta, cujo coeficiente angular é utilizado para a determinação da incerteza.

Na expressão de U_{Di} , as incertezas de quase todos os termos são relativamente baixas. Além disso, para a determinação de K_{IC} é considerada a constante α , que tem sua incerteza equivalente a apenas 1 % do seu valor original.

Já o modelo de Yu et al. (2023) apresenta diversas variáveis, principalmente os coeficientes adimensionais $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2$ e c_3 que têm incertezas de 5 % cada um. Este é um dos motivos fazem com que a incerteza fique um pouco mais elevada, além também da expressão para o cálculo de η .

Agora comparado com o valor de referência de tenacidade à fratura estimado por Melo (2019) para o aço 4130 M, que é igual a 198,0 kJ/m² para J_{IC} e de 214,0 MPa.m^{0,5} para K_{IC} , observa-se que a tenacidade obtida pela metodologia de Lee et al. (2006) é muito inferior. Ela apresenta uma diferença de cerca de 22 % em relação à referência. Já a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) apresenta uma diferença de 9 % em relação à referência e a metodologia de Yu et al. (2023) se difere em apenas 2 %.

Percebe-se, portanto, que a metodologia de Yu et al (2023), apesar de apresentar a maior das incertezas expandidas, é a que mais se aproxima do valor real de tenacidade à fratura. Já a metodologia de Lee et al. (2006) possui a menor incerteza expandida dentre as três metodologias. No entanto, ela não é tão exata quanto as demais no que diz respeito ao valor de tenacidade obtido.

O erro máximo de cada metodologia pode ser calculado. Ele consiste na soma da diferença do valor de tenacidade em relação à referência com a respectiva incerteza expandida. A Tabela 4.27 apresenta os erros máximos das três metodologias analisadas.

Tabela 4.27 – Erro máximo das metodologias estudadas. Fonte: Próprio autor.

Metodologia	Erro máximo [MPa·m^{0,5}]
Lee et al. (2006)	52,37
Zhang, Wang e Wang (2019a)	27,01
Yu et al. (2023)	26,63

Pela análise da Tab. 4.27, percebe-se que a metodologia de Yu et al. (2023) apresenta o menor erro máximo, que é equivalente a 26,63 MPa·m^{0,5}. O erro máximo da metodologia de Zhang, Wang e Wang também é pouco expressivo (27,01 MPa·m^{0,5}) quando comparado com a metodologia de Lee et al. (2006), que é igual a 52,37 MPa·m^{0,5}.

A Figura 4.12 contém a representação gráfica do valor de tenacidade à fratura das metodologias analisadas e o erro máximo representado pelas barras de erro. Já a Fig. 4.13 apresenta a tenacidade à fratura com as barras de erro indicando os valores de incerteza expandida.

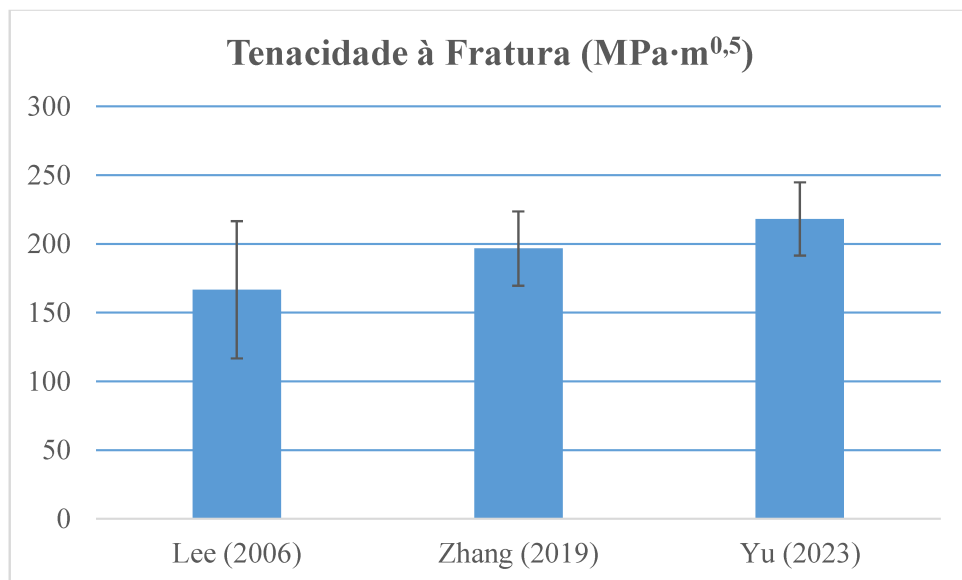


Figura 4.12 – Tenacidade à fratura das três metodologias estudadas e os erros máximos representados pelas barras de erros. Fonte: Próprio autor.

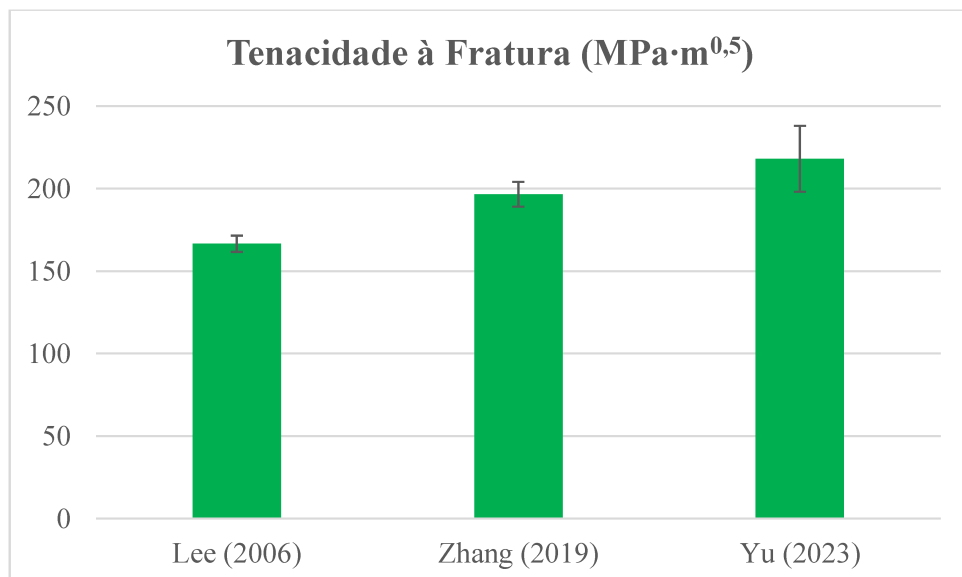


Figura 4.13 – Tenacidade à fratura das três metodologias estudadas e as incertezas expandidas representadas pelas barras de erros. Fonte: Próprio autor.

Vale destacar que nas condições experimentais deste estudo, a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) mostrou um desempenho similar à metodologia de Yu et al. (2023), uma vez que o erro máximo associado aos valores de tenacidade à fratura é, para ambas, da ordem de 14 %. Por outro lado, a metodologia de Lee et al. (2006) apresentou erro máximo de aproximadamente 31 %.

A metodologia de Yu et al. (2023) demonstrou uma boa exatidão, sendo que a diferença entre o valor médio de tenacidade à fratura obtido e o valor de referência é de apenas 2 %. Entretanto a incerteza expandida associada é mais elevada, de ordem de 9 %, o que se mostra como um valor aceitável considerando que o cálculo da tenacidade à fratura é complexo e que muitas variáveis estão envolvidas nas operações efetuadas.

Os valores de tenacidade obtidos via metodologia de Lee et al. (2006) apresentam qualidade superior, com um valor de incerteza de $4,94 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ (equivalente a 3 % em relação ao valor de tenacidade à fratura calculado). O erro máximo associado assume, para esta metodologia, o valor de $52,37 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças estatisticamente significativas entre os valores de tenacidade à fratura decorrentes das quatro metodologias consideradas (Lee et al 2006, Zhang, Wang e Wang (2019), Yu et al. (2023) e Melo (2019)). O valor de p resultante foi de 0,0293, o que faz com que a hipótese nula H_0 seja rejeitada. Por sua vez, o teste U de Mann-Whitney resultou em valores de $p < 0,05$ para Lee et al. (2006) e Zhang, Wang e Wang (2019a), indicando que os valores obtidos pelos autores são diferentes daqueles obtidos por Melo (2019). Em contraste, para a metodologia de Yu et al. (2023) foi obtido um valor de $p > 0,05$. Portanto pode-se concluir que esta metodologia fornece valores estatisticamente iguais aos obtidos por Melo (2019).

A Tabela 4.28 mostra uma comparação entre os valores de tenacidade à fratura obtidos pelas três metodologias avaliadas e resultados obtidos por outros pesquisadores do LTAD. Nesta comparação foram considerados os valores de desvio padrão (Figura 4.15) e de incerteza expandida (Figura 4.15) quando declarados.

Tabela 4.28 – Tabela comparativa dos valores de tenacidade à fratura com desvio padrão e incerteza expandida, considerando trabalhos dos pesquisadores do LTAD. Fonte: Próprio autor.

Autor	Material	Técnica	Tenacidade à fratura [MPa.m ^{0,5}]	Desvio padrão [MPa.m ^{0,5}]	Incerteza expandida [MPa.m ^{0,5}]
Lee et al. (2006)	4130 M	Indentação instrumentada	166,57	4,90	4,94
Zhang, Wang e Wang (2019)	4130 M	Indentação instrumentada	196,56	3,02	7,52
Yu et al. (2023)	4130 M	Indentação instrumentada	218,08	3,02	19,97
Melo (2019)	AISI 4137	Integral J E1820	143,34	7,15	-
Melo (2019)	4130 M	Integral J E1820	213,61	1,45	-
Silva (2023b)	AISI 4340	Integral J E1820	182,70	7,00	35,70

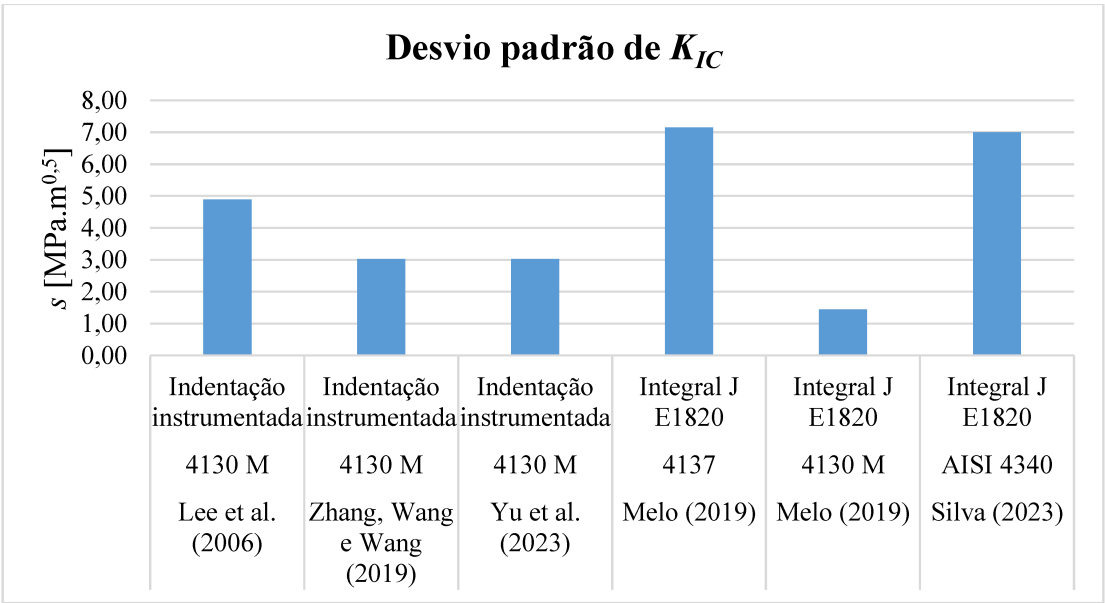


Figura 4.14 – Desvio padrão da tenacidade à fratura K_{IC} considerando os trabalhos dos pesquisadores do LTAD. Fonte: Próprio autor.

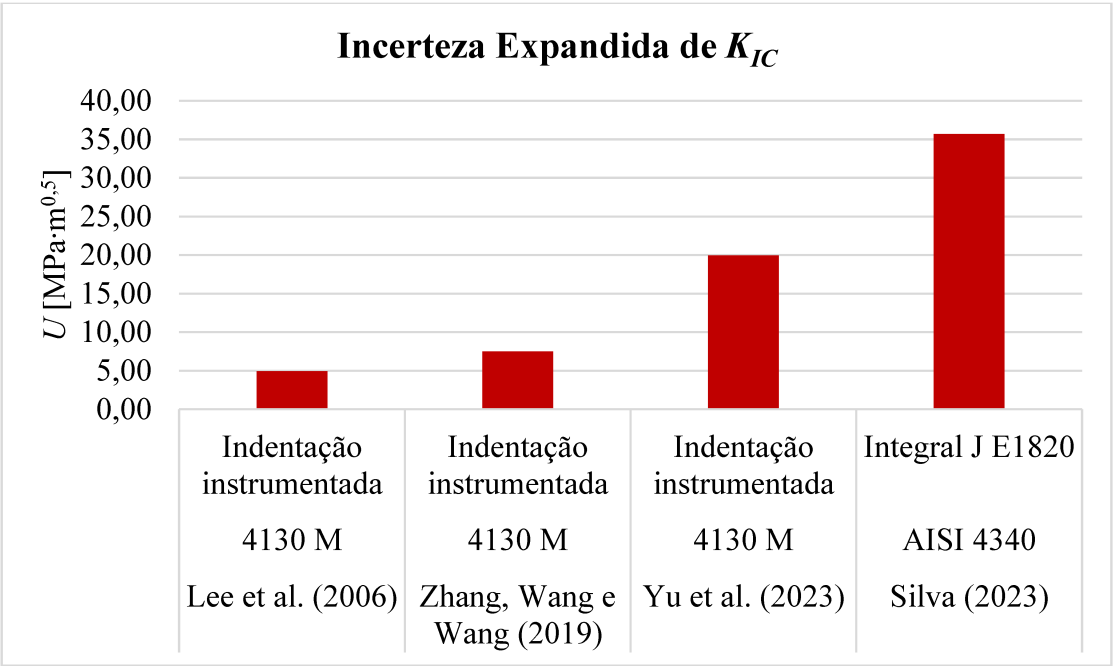


Figura 4.15 – Incerteza expandida da tenacidade à fratura K_{IC} dos trabalhos abordados nesta tese e do trabalho de Silva (2023b). Fonte: Próprio autor.

A partir das Figuras 4.14 e 4.15 pode-se concluir que a técnica de indentação instrumentada, nas condições experimentais deste estudo, se mostrou adequada para determinar a tenacidade à fratura. Com desempenho metrológico em termos de repetibilidade e incerteza similares ao método da Integral J proposto pela ASTM E1820 (ASTM, 2018).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a quantificar a incerteza de medição da tenacidade à fratura via técnica da indentação instrumentada obtida de acordo com três metodologias distintas. Constatou-se que cada metodologia apresenta particularidades para a obtenção da tenacidade à fratura K_{IC} , o que resultou inclusive em valores diferentes de tenacidade. Os valores da incerteza associada também foram diferentes.

Com relação à metodologia de Lee et al. (2006), as seguintes conclusões foram formuladas:

- a) O valor médio da tenacidade à fratura K_{IC} obtido considerando três ensaios foi $166,58 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$. A incerteza padrão combinada desse parâmetro para um ensaio foi de $0,31 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e a incerteza expandida para três ensaios foi de $4,94 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$, este último valor considerando um nível de abrangência de 95,45 % e fator $k = 2,00$. Isso corresponde a 3 % do valor médio de K_{IC} . Esta incerteza é adequada e atribui ao valor de tenacidade obtido aplicando esta metodologia excelente qualidade.
- b) A diferença entre o valor de tenacidade à fratura obtido por meio desta metodologia e do valor de referência obtido por Melo (2019), denominado de tendência, é de aproximadamente 23,0 %. Esta diferença é a mais elevada dentre as três metodologias de cálculo da tenacidade à fratura via indentação instrumentada estudadas.
- c) Por sua vez, o erro máximo para a tenacidade à fratura é de 24,5 %. Considerando que este parâmetro metrológico é aquele que melhor caracteriza o resultado de medição,

pode-se concluir que nas condições experimentais deste estudo, esta metodologia exibiu o pior desempenho e deve ser utilizada com cautela.

Para a metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a), foram obtidas as seguintes conclusões:

- a) A incerteza expandida do J_{SIT} considerando um único ensaio é igual a $0,624 \text{ kJ}\cdot\text{m}^2$. Já para os três ensaios realizados, a incerteza expandida foi de $1,486 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ para um nível de abrangência de 95,45 % e fator $k = 2,00$, com J_{SIT} igual a $20,490 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$. Isso equivale a 6,2 % do valor da taxa de liberação de energia, demonstrando também uma boa qualidade dos valores obtidos.
- b) Os valores médios de K_{IIC} e K_{IC} obtidos considerando três ensaios foram, respectivamente, $68,797 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e $196,562 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$. As incertezas expandidas desses parâmetros foram de $2,511 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e $7,520 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$, para um nível de abrangência de 95,45 % e fator $k = 2,00$. Estes valores representam 3,6 % e 3,8 % em relação às respectivas variáveis.
- c) A diferença entre o valor de tenacidade à fratura obtido por meio desta metodologia e do valor de referência obtido por Melo (2019) é de aproximadamente 9,0 %. Este fato é indicativo da boa exatidão dos resultados obtidos.
- d) O erro máximo obtido para a metodologia proposta por Zhang, Wang e Wang (2019) é de 12,8 %, que se mostra como um valor aceitável.

Por fim, no que diz respeito à metodologia proposta por Yu et al. (2023), foram formuladas as seguintes conclusões:

- a) Considerando um único ensaio, as incertezas padrão combinadas são iguais a $1,762 \text{ kJ}\cdot\text{m}^2$, $2,710 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e $7,846 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ para $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} . As incertezas expandidas de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} considerando os três ensaios efetuadas são respectivamente $4,573 \text{ kJ}\cdot\text{m}^2$, $6,932 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e $19,970 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$. Considerando que os valores médios de $J_{IC,III}$, $K_{JC,III}$ e K_{IC} são $25,857 \text{ kJ}\cdot\text{m}^2$, $77,231 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e $220,660 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ respectivamente. As incertezas equivalem respectivamente a 18,1 %, 9,1 % e 9,2 % das variáveis mencionadas. Dentre as três metodologias estudadas, esta foi a que apresentou maiores dispersões dos mensurandos.

- b) A diferença do valor de K_{IC} obtido pela metodologia de Yu et al. (2023) e do valor de referência estabelecido por Melo (2019) é inferior a 2 %, o que denota a ótima exatidão desta metodologia.
- c) O erro máximo é de 11,2 %, que é o menor valor dentre as três metodologias estudadas.

Em síntese, as incertezas expandidas das metodologias de Lee et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019) e Yu et al. (2023) foram $4,94 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$, $7,520 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ e $19,970 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$, respectivamente. Já o erro máximo foi de 24,5 %, 12,8 % e 11,2 % para as três metodologias consideradas. O erro máximo foi maior para a metodologia de Lee et al. (2006), ficando acima de 20 %, apesar da incerteza desta metodologia ser a menor dentre as três analisadas. Em oposição a este fato, a metodologia de Yu et al. (2023) apresentou a maior incerteza expandida, mas o erro máximo ficou próximo de 11 %, o que demonstra a excelente qualidade dos resultados fornecidos por esta metodologia.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças estatisticamente significativas entre os valores de tenacidade à fratura decorrentes das quatro metodologias consideradas (Lee et al 2006, Zhang, Wang e Wang (2019), Yu et al. (2023) e Melo (2019)). O valor de p resultante foi de 0,0293. O teste estatístico de Mann-Whitney indicou que apenas a metodologia de Yu et al. (2023) fornece valores estatisticamente iguais aos obtidos por Melo (2019), para um nível de abrangência de 95 %.

A técnica de indentação instrumentada, nas condições experimentais deste estudo, se mostrou adequada para determinar a tenacidade à fratura. Com desempenho metrológico em termos de repetibilidade e incerteza similares ao método da Integral J proposto pela ASTM E1820 (ASTM, 2018).

A implementação dos códigos em MATLAB relativos às metodologias de Lee et al. (2006), Zhang, Wang e Wang (2019a) e Yu et al. (2023) facilitam a estimativa da incerteza por parte dos pesquisadores e demais profissionais e popularizam esta tarefa.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos após a realização deste trabalho, são apresentadas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- a) Calcular a incerteza relacionada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada pela metodologia proposta por Haggag et al. (1990);
- b) Estimar a incerteza relacionada à tenacidade à fratura obtida via indentação instrumentada pela metodologia proposta por Jeon et al. (2017);
- c) Fazer um estudo comparativo das incertezas obtidas por todas as metodologias acima citadas e daquelas estudadas neste trabalho, considerando a tendência, exatidão, incerteza e erro máximo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALMEIDA, L. F. M. “Avaliação da susceptibilidade à fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência e baixa liga usando ensaios de puncionamento esférico em meio assistido”. 2022. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.5021>

AMIRI, S.; LECIS, N.; MANES, A.; GIGLIO, M. “A study of a micro-indentation technique for estimating the fracture toughness of Al6061-T6”. Mechanics Research Communications, v. 58, p. 10-16, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2013.10.013>

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

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

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 100 – “Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”. 2008a.

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

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML. “Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Extension to any number of output quantities”. JCGM 102. 2011.

BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML. “Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement”. JCGM 100. 2008b.

BYUN, T. S.; KIM, J. W.; HONG, J. H. “A theoretical model for determination of fracture toughness of reactor pressure vessel steels in the transition region from automated ball indentation test”. Journal of Nuclear Materials, v. 252, n. 3, p. 187-194, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(97\)00338-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(97)00338-3)

BYUN, T. S.; KIM, S. H.; LEE, B. S.; KIM, I. S.; HONG, J. H. “Estimation of fracture toughness transition curves of RPV steels from ball indentation and tensile test data”. Journal of nuclear materials, v. 277, n. 2-3, p. 263-273, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(99\)00197-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(99)00197-X)

CHEN, J. “Indentation-based methods to assess fracture toughness for thin coatings”. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 45, n. 20, p. 203001, 2012. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/20/203001>

DÉSENFANT, M., PRIEL, M., “Reference and additional methods for measurement uncertainty evaluation”. Measurement 95:339–344. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.022>

FERNANDES, K. A. “Avaliação da qualidade dimensional e geométrica de cilindros de bloco de compressores herméticos usinados pelo processo de brunimento flexível”. 2014, 188 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2014.4755>

GABAUER, W. “The determination of uncertainties in tensile testing. Manual of codes of practice for the determination of uncertainties in mechanical tests on metallic materials”. Code of Practice No. 07. Austria. 35 p. 2000.

GRABA, M. "Evaluation of measurement uncertainty in a static tensile test" Open Engineering, vol. 11, no. 1, 2021, pp. 709-722. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0069>

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; HUTTON, J. T.; THOMAS, D. L.; SWAIN, R. L. "Use of automated ball indentation testing to measure flow properties and estimate fracture toughness in metallic materials. In: Applications of automation technology to fatigue and fracture testing". ASTM International, 1990. <https://doi.org/10.1520/STP25039S>

HARRIS, P. M.; COX, M. G. "On a Monte Carlo method for measurement uncertainty evaluation and its implementation". Metrologia, v. 51, n. 4, 1 ago. 2014. p.176–182. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/4/S176>

HE, M.; LI, F.; CAI, J.; CHEN, B. "An indentation technique for estimating the energy density as fracture toughness with Berkovich indenter for ductile bulk materials". Theoretical and applied fracture mechanics, v. 56, n. 2, p. 104-111, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2011.10.006>

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). "A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo". 2008.

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. Pp. 361-365. <https://doi.org/10.1115/1.4011547>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO), ISO/TR 29381. "Metallic materials - Measurement of mechanical properties by an instrumented indentation test - Indentation tensile properties". Relatório técnico. 2008.

JEON, S. W.; JEON, S. W.; LEE, K. W.; KIM, J. Y.; KIM, W. J.; PARK, C. P.; KWON, D. “Estimation of fracture toughness of metallic materials using instrumented indentation: critical indentation stress and strain model”. *Experimental Mechanics*. v. 57, n. 7, p. 1013-1025, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11340-016-0226-2>

KOEPKE, L.; WEEKS, T.S.; SPLETT, J. “Using Monte Carlo methods to compute the uncertainty of fracture toughness and fracture resistance curves”. NIST Technical Note, 30 p. 2023. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2212>

LANDGRAF, W. R.; STEMPNIAK, C. R. “Simulação de Monte Carlo e ferramentas para avaliação da incerteza de medição”. IV METROSUL, 2004. Foz de Iguaçu, Paraná, Brasil: 2004.

LEE, J. S.; JANG, J. I.; LEE, B. W.; CHOI, Y.; LEE, S. G.; KWON, D. “An instrumented indentation technique for estimating fracture toughness of ductile materials: A critical indentation energy model based on continuum damage mechanics”. *Acta materialia*, v. 54, n. 4, p. 1101-1109, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.033>

LI, J.; LI, F.; HE, M.; XUE, F.; ZHANG, M.; WANG, C. “Indentation technique for estimating the fracture toughness of 7050 aluminum alloy with the Berkovich indenter”. *Materials & Design*, v. 40, p. 176-184, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.054>

LI, J.; LI, F.; MA, X.; WANG, Q.; DONG, J.; YUAN, Z. “A strain-dependent ductile damage model and its application in the derivation of fracture toughness by micro-indentation”. *Materials & Design*, v. 67, p. 623-630, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.010>

MATHEW, M. D.; MURTY, K. L.; RAO, K. B. S.; MANNAN, S. L. “Ball indentation studies on the effect of aging on mechanical behavior of alloy 625”. *Materials Science and Engineering: A*, v. 264, n. 1-2, p. 159-166, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01098-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01098-3)

MELO, G. F. “Tenacidade à fratura e fragilização por hidrogênio de aços de alta resistência e baixa liga”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.54>

MOHAMMADI, A. H.; NADERI, M.; IRANMANESH, M. “Fracture toughness evaluation of 3Cr-1Mo steel from Vickers indentation and tensile test data”. Procedia Engineering, v. 10, p. 228-235, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.041>

MURTY, K. L; MATHEW, M. D.; WANG, Y.; SHAH, V. N.; HAGGAG, F. M. “Nondestructive determination of tensile properties and fracture toughness of cold worked A36 steel”. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 75, n. 11, p. 831-840, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(98\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(98)00093-3)

NICOLOSI, E. R. “Avaliação de Métodos Analíticos para Determinação de Propriedades Mecânicas de Aços Via Ensaio de Macroindentação Instrumentada”. 2015. 308 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.113>

RANGEL, E. R. “Fracture Toughness Determinations by Means of Indentation Fracture”. In: CUPPOLETTI, J. (Ed.). Nanocomposites with unique properties and applications in medicine and industry. Croatia, 2011. p. 21-38. <https://doi.org/10.5772/18127>

RODRIGUES, G. B. “Avaliação da tenacidade à fratura: método Teste de Torção em Entalhe Helicoidal”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 137 p. 2020. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.8>

SILVA, A. L. M. G. “Determinação da flexibilidade elástica de equipamentos de indentação instrumentada”. 2023a. 57 p. Monografia de Projeto de Fim de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SILVA, J. A. “Avaliação da incerteza associada à tenacidade à fratura obtida via Integral J”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 120 p. 2023b. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.145>

SOUZA, C. C.; MOURA, R.P.G.; BOSE FILHO, W.W. ARENCIBIA, R.V. Assessment of measurement uncertainty associated with fracture toughness calculation based on energy release rate in spherical indentation tests. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 135. 2025. 104775. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104775>

VALDÉS, R. A.; NOVASKI, O.; SATO, DENISE P. V., “Estimativa de Incerteza Usando o Método de Monte Carlo”. In: *Metrologia* 2009, Salvador. 2009. p. 1-8.

WEN, X.-L.; ZHAO, Y.-B.; WANG, D.-X.; PAN, J. “Adaptive Monte Carlo and GUM methods for the evaluation of measurement uncertainty of cylindricity error”. *Precision Engineering*, v. 37, n. 4, out. 2013. p. 856–864. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.05.002>

YU, F.; FANG, J.; OMACHT, D.; SUN, M.; LI, Y. “A new instrumented spherical indentation test methodology to determine fracture toughness of high strength steels”. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 124, 12 p, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103744>

YU, F; JAR, P.-Y. B; HENDRY, M. T. “Indentation for fracture toughness estimation of high-strength rail steels based on a stress triaxiality-dependent ductile damage model”. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 94, p. 10-25, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.01.003>

ZHANG, T.; WANG, S.; WANG, W. “A unified energy release rate based model to determine the fracture toughness of ductile metals from unnotched specimens”. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 150, p. 35-50, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.022>

ZHANG, T.; WANG, S.; WANG, W. “A comparative study on fracture toughness calculation models in spherical indentation tests (SITs) for ductile metals”. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 160, p. 114-128, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.06.035>

APÊNDICE I – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Lee et al. (2006) – Ensaio 1

Ciclo	P_{maxi} [N]	S_i [N/mm]	h_{maxi} [mm]
1	149,1132308	33695,55386	0,02038698
2	200,3344841	37841,11757	0,02744056
3	255,914993	40606,40763	0,0349615
4	310,9483709	44226,14703	0,04224622
5	365,3011711	45625,60695	0,04937854
6	419,2491832	48298,8175	0,05663278
7	473,7398782	49934,0934	0,06407498
8	525,6417092	52025,38261	0,07126826
9	577,4056453	54127,5903	0,07852504
10	629,7167125	56324,56883	0,08591898
11	680,1194933	57827,82294	0,09308178
12	731,3407466	60469,3934	0,10066368

Ciclo	h_c^* [mm]	a^* [mm]	E_D [MPa]
1	0,017067998	0,11311122	169152,0769
2	0,023469988	0,13207126	161165,7583
3	0,030234752	0,14921741	151275,6722
4	0,036973066	0,16425288	149329,1812
5	0,043373669	0,17712106	141520,4957
6	0,05012254	0,18951256	139708,5562
7	0,056959503	0,20105862	135436,5023
8	0,063690588	0,21159622	133815,6222
9	0,070524421	0,22157398	132785,5434
10	0,077533873	0,23115176	132384,7306
11	0,084260946	0,23979189	130759,1221
12	0,091592884	0,24866032	132067,9427

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	$\ln(h_c \cdot 1000)$	$\ln(E_D)$
1	2,837205272	12,03855345
2	3,15572252	11,99018867
3	3,408992	11,92685909
4	3,610189705	11,91390842
5	3,769852555	11,86019983
6	3,91447081	11,84731379
7	4,042340536	11,81625819
8	4,154036798	11,80421818
9	4,255959045	11,79649065
10	4,350714912	11,79346759
11	4,433918485	11,78111215
12	4,517353578	11,79107179

Ciclo	h/R_{ind}	P_{mi}
1	0,053183427	3709,83771
2	0,07158407	3655,857058
3	0,091203914	3658,531897
4	0,110207531	3668,701793
5	0,128813584	3706,472422
6	0,147737688	3715,74878
7	0,167152123	3730,30805
8	0,185917202	3737,009007
9	0,204847932	3743,636204
10	0,224136472	3751,465486
11	0,242822037	3765,011994
12	0,262600907	3764,930195

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Lee et al. (2006) – Ensaio 2

Ciclo	P_{maxi} [N]	S_i [N/mm]	h_{maxi} [mm]
1	149,6826575	33531,86043	0,02027682
2	201,5845074	37266,23522	0,02742438
3	255,5325392	41464,51492	0,03481832
4	309,3426761	44032,86818	0,04205732
5	365,0566519	46414,19619	0,04971796
6	417,7769746	48008,56426	0,05684774
7	471,31577	50244,6221	0,0639953
8	521,856464	52195,42416	0,07121906
9	571,8500268	54067,34497	0,0788162
10	601,8176959	54741,56716	0,08194802
11	679,0610643	58169,72714	0,09317228
12	729,0546271	61517,06921	0,09712452

Ciclo	h_c^* [mm]	a^* [mm]	E_D [MPa]
1	0,0169289	0,11265982	168968,314
2	0,0233674	0,13179139	158563,6157
3	0,03019631	0,14912641	155316,028
4	0,036788369	0,16386285	148965,2383
5	0,043819065	0,17797333	143646,995
6	0,050321139	0,18986132	138391,8094
7	0,056959983	0,2010594	136446,5772
8	0,063720465	0,21164134	134304,8351
9	0,070883731	0,22208037	132248,0261
10	0,073702672	0,22599402	131449,3715
11	0,084416939	0,23998632	131554,2046
12	0,088236077	0,24466723	137451,72

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	$\ln(h_c \cdot 1000)$	$\ln(E_D)$
1	2,829022208	12,03746648
2	3,151341878	11,97391115
3	3,40771973	11,95321721
4	3,605181746	11,91146826
5	3,780068987	11,87511415
6	3,918425252	11,83784414
7	4,042348974	11,82368844
8	4,154505782	11,80786738
9	4,261040948	11,79243442
10	4,300039053	11,78637705
11	4,43576808	11,78717425
12	4,480015914	11,83102801

Ciclo	h/R_{ind}	P_{mi}
1	0,052896053	3753,906867
2	0,071541861	3694,308765
3	0,090830401	3657,524097
4	0,109714749	3667,152584
5	0,129699027	3668,601596
6	0,148298453	3689,11007
7	0,166944262	3711,191408
8	0,185788854	3708,516143
9	0,20560748	3690,727097
10	0,213777445	3750,776465
11	0,243058124	3753,06417
12	0,253368315	3876,667828

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Lee et al. (2006) – Ensaio 3

Ciclo	P_{maxi} [N]	S_i [N/mm]	h_{maxi} [mm]
1	149,7137405	34938,99735	0,02043016
2	202,838832	37998,80313	0,0276844
3	255,6970303	41718,31807	0,0348472
4	313,9998498	44153,52751	0,04241386
5	363,3128167	46159,82394	0,04949792
6	416,8515926	49021,30001	0,05687662
7	469,5718961	50977,12167	0,06419436
8	521,2023856	52687,51962	0,07138764
9	573,375558	54847,22564	0,07870538
10	624,4589165	56312,37315	0,08614758
11	674,1811196	58052,50265	0,09334086
12	722,4042727	60029,01729	0,10057986

Ciclo	h_c^* [mm]	a^* [mm]	E_D [MPa]
1	0,017216407	0,11359067	176073,8884
2	0,023680876	0,13264447	161131,4224
3	0,030250352	0,14925432	156319,953
4	0,0370802	0,16447861	148781,287
5	0,043594851	0,17754495	143111,5908
6	0,050499011	0,19017297	141637,6448
7	0,057285792	0,20158731	138403,272
8	0,063968392	0,21201528	135536,0095
9	0,070864844	0,22205379	134551,0676
10	0,077830683	0,23154389	132082,9599
11	0,084630885	0,24025256	131064,7189
12	0,091554172	0,24861489	130950,0709

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	$\ln(h_c \cdot 1000)$	$\ln(E_D)$
1	2,845862828	12,07865901
2	3,164667798	11,9899756
3	3,409507816	11,95966017
4	3,613083144	11,91023263
5	3,774939054	11,87137996
6	3,921953748	11,86102728
7	4,048052631	11,83792696
8	4,158389082	11,81699264
9	4,260774452	11,80969909
10	4,354535741	11,79118549
11	4,438299272	11,78344652
12	4,516930837	11,78257139

Ciclo	h/R_{ind}	P_{mi}
1	0,05329607	3693,400941
2	0,072220175	3669,635785
3	0,09090574	3653,608283
4	0,110644853	3694,543038
5	0,12912501	3668,717034
6	0,148373793	3668,884351
7	0,167463549	3678,119474
8	0,186228628	3690,814405
9	0,205318384	3701,458734
10	0,224732819	3707,552705
11	0,243497898	3717,839823
12	0,262382246	3720,284511

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) – Ensaio 1

Ciclo	P_{maxi} [N]	S_i [N/mm]	h_{pi} [mm]
1	149,1132308	33695,55386	0,016182352
2	200,3344841	37841,11757	0,022344556
3	255,914993	40606,40763	0,02884264
4	310,9483709	44226,14703	0,035449979
5	365,3011711	45625,60695	0,041663615
6	419,2491832	48298,8175	0,04826549
7	473,7398782	49934,0934	0,054897931
8	525,6417092	52025,38261	0,061488883
9	577,4056453	54127,5903	0,068231994
10	629,7167125	56324,56883	0,075153336
11	680,1194933	57827,82294	0,081795966
12	731,3407466	60469,3934	0,088946437

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	h_{maxi} [mm]	S_0 [N/mm]
1	0,02038698	31706,5008
2	0,02744056	37083,41781
3	0,0349615	42223,19275
4	0,04224622	46842,50316
5	0,04937854	51086,13312
6	0,05663278	55238,4673
7	0,06407498	59335,97217
8	0,07126826	63211,7655
9	0,07852504	67058,94079
10	0,08591898	70933,09734
11	0,09308178	74645,002
12	0,10066368	78575,49394

Ciclo	a_{effi} [mm]	E_{eff} [MPa]	D_i
1	0,090142767	226566,4706	-0,077647634
2	0,105421637	214731,0236	-0,021353155
3	0,120023232	198794,222	0,054449132
4	0,13314223	194152,807	0,076525699
5	0,145191532	180895,3816	0,139583719
6	0,156977661	176140,658	0,162199231
7	0,16860493	167922,8588	0,20128662
8	0,179599068	163365,1754	0,222964924
9	0,190508072	159501,4103	0,241342653
10	0,201489437	156340,1801	0,256378825
11	0,212007087	151706,8141	0,278417107
12	0,223139202	150505,4547	0,284131289

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	A_{eqi} [mm²]	U_D [n·mm]
1	-0,001982165	-0,035684822
2	-0,000745541	-0,028454797
3	0,002464175	0,010524858
4	0,004261758	0,028639678
5	0,009244155	0,108087438
6	0,012556667	0,168953833
7	0,017976507	0,289501358
8	0,022594076	0,392473909
9	0,027517611	0,494316646
10	0,03269916	0,603719836
11	0,039313938	0,749315479
12	0,044444772	0,89155225

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) – Ensaio 2

Ciclo	P_{maxi} [N]	S_i [N/mm]	h_{pi} [mm]
1	149,6826575	33531,8604	0,015931306
2	201,5845074	37266,2352	0,022213072
3	255,5325392	41464,5149	0,028801572
4	309,3426761	44032,8682	0,035224933
5	365,0566519	46414,1962	0,041935674
6	417,7769746	48008,5643	0,04831271
7	471,31577	50244,6221	0,054927619
8	521,856464	52195,4242	0,061507633
9	571,8500268	54067,345	0,068302417
10	629,4722897	56830,8781	0,075224652
11	679,0610643	58169,7271	0,081852335
12	729,0546271	61517,0692	0,088951607

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	h_{maxi} [mm]	S_0 [N/mm]
1	0,02027682	30552,02922
2	0,02742438	35825,47919
3	0,03481832	40727,91183
4	0,04205732	45160,48284
5	0,04971796	49567,05448
6	0,05684774	53494,11497
7	0,0639953	57322,57641
8	0,07121906	61081,7558
9	0,0788162	64940,26975
10	0,08591804	68564,68995
11	0,09317228	72191,77689
12	0,10047478	75884,05636

Ciclo	a_{effi} [mm]	E_{eff} [MPa]	D_i
1	0,089863781	226033,011	-0,075110271
2	0,105366711	210605,989	-0,001732715
3	0,119775229	204802,9014	0,025869267
4	0,132799439	193704,0365	0,078660244
5	0,14574385	183979,7163	0,124913296
6	0,157276064	174394,427	0,170505057
7	0,168514822	169339,1287	0,194550231
8	0,179546932	164086,5934	0,219533549
9	0,190867039	158913,0832	0,24414099
10	0,201517113	158044,444	0,248272612
11	0,212127728	152698,3306	0,273701028
12	0,222946011	153863,8066	0,268157523

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	A_{eqi} [mm²]	U_D [n·mm]
1	-0,001905542	-0,027707801
2	-6,04344E-05	-0,020678585
3	0,001165918	-0,002979298
4	0,004358105	0,03673729
5	0,008335641	0,126104538
6	0,013249894	0,211932056
7	0,017356328	0,270841731
8	0,022233445	0,386863798
9	0,027941676	0,580851144
10	0,031673974	0,582207363
11	0,038692	0,766288092
12	0,041873501	0,825673124

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a) – Ensaio 3

Ciclo	P_{maxi} [N]	S_i [N/mm]	h_{pi} [mm]
1	149,7137405	34938,9974	0,01627525
2	202,838832	37998,8031	0,02250794
3	255,6970303	41718,3181	0,028919501
4	313,9998498	44153,5275	0,035552301
5	363,3128167	46159,8239	0,041788754
6	416,8515926	49021,3	0,0486072
7	469,5718961	50977,1217	0,055226024
8	521,2023856	52687,5196	0,061742976
9	573,375558	54847,2256	0,068604428
10	624,4589165	56312,3731	0,075411039
11	674,1811196	58052,5027	0,082432789
12	722,4042727	60029,0173	0,088915201

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	h_{maxi} [mm]	S_0 [N/mm]
1	0,02043016	31706,5008
2	0,0276844	37083,41781
3	0,0348472	42223,19275
4	0,04241386	46842,50316
5	0,04949792	51086,13312
6	0,05687662	55238,4673
7	0,06419436	59335,97217
8	0,07138764	63211,7655
9	0,07870538	67058,94079
10	0,08614758	70933,09734
11	0,09334086	74645,002
12	0,10057986	78575,49394

Ciclo	a_{effi} [mm]	E_{eff} [MPa]	D_i
1	0,090251181	237457,1074	-0,129448189
2	0,105909337	214602,0152	-0,020739535
3	0,119849037	206270,2696	0,018889832
4	0,133422199	193221,772	0,080954102
5	0,145393908	183259,2438	0,128340173
6	0,157401837	178858,1912	0,149273473
7	0,16886033	171990,1078	0,181941033
8	0,179830088	165685,1727	0,211930018
9	0,190854086	161762,3528	0,230588638
10	0,201844764	155960,5211	0,258184646
11	0,21255711	151945,6641	0,277281034
12	0,223038138	149252,088	0,290092841

**APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS
PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA**

Ciclo	A_{eqi} [mm²]	U_D [n·mm]
1	-0,003312468	-0,040539251
2	-0,000730832	-0,02492764
3	0,000852407	-0,014387201
4	0,004527359	0,03118809
5	0,008523244	0,115287317
6	0,011618555	0,160824374
7	0,016298056	0,257183461
8	0,021531142	0,375040407
9	0,026387042	0,457394347
10	0,033045723	0,617481832
11	0,039356939	0,650024295
12	0,045336203	0,901119083

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Yu et al. (2023) – Ensaio 1

Variável	Valor
$A(E/\sigma_y)$	92,52242122
$B(E/\sigma_y)$	-7,26467084
$C(E/\sigma_y)$	3,793885684
Pm_{cr}/σ_y	3,992642812
Pm_{cr}	2351,634206 MPa
h_{cr}	0,010722924 mm

Ciclo	h_c^*	P_{mi}
1	0,017067998	3743,127738
2	0,023469988	3688,947843
3	0,030234752	3691,953861
4	0,036973066	3702,529008
5	0,043373669	3740,953141
6	0,05012254	3750,644428
7	0,056959503	3765,681113
8	0,063690588	3772,788171
9	0,070524421	3779,834078
10	0,077533873	3788,111619
11	0,084260946	3802,156591
12	0,091592884	3802,481425

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Yu et al. (2023) – Ensaio 2

Variável	Valor
$A(E/\sigma_y)$	90,31727193
$B(E/\sigma_y)$	-6,801750839
$C(E/\sigma_y)$	3,757269496
Pm_{cr}/σ_y	3,980267132
Pm_{cr}	2414,092352 MPa
h_{cr}	0,011863738 mm

Ciclo	h_c^*	P_{mi}
1	0,0169289	3787,586041
2	0,0233674	3727,742936
3	0,03019631	3690,935095
4	0,036788369	3700,956879
5	0,043819065	3702,751234
6	0,050321139	3723,765242
7	0,056959983	3746,383219
8	0,063720465	3744,024032
9	0,070883731	3726,43199
10	0,073702672	3787,211331
11	0,084416939	3790,099443
12	0,088236077	3915,140312

APÊNDICE I (CONTINUAÇÃO) – VALORES DOS PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA

Metodologia de Yu et al. (2023) – Ensaio 3

Variável	Valor
$A(E/\sigma_y)$	99,44024902
$B(E/\sigma_y)$	-8,728523674
$C(E/\sigma_y)$	3,909186163
Pm_{cr}/σ_y	4,030736286
Pm_{cr}	2174,385378 MPa
h_{cr}	0,010906927 mm

Ciclo	h_c^*	P_{mi}
1	0,017216407	3726,550096
2	0,023680876	3702,8608
3	0,030250352	3686,985983
4	0,037080200	3728,61357
5	0,043594851	3702,857058
6	0,050499011	3703,358164
7	0,057285792	3713,013848
8	0,063968392	3726,165393
9	0,070864844	3737,266465
10	0,077830683	3743,785635
11	0,084630885	3754,539123
12	0,091554172	3757,388298

APÊNDICE II – ETAPAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

Metodologia de Lee et al. (2006):

1. Coletar os valores de P_{maxi} , h_{maxi} e S_i equivalentes a 12 ciclos de indentação instrumentada.
2. Calcular h_c^* para os 12 ciclos de indentação de acordo com a seguinte equação:

$$h_c^* = h_{maxi} - (0,75 * \frac{P_{maxi}}{S_i})$$

3. Calcular E_D para os 12 ciclos de acordo com a equação abaixo:

$$E_D = \frac{(1 - \nu^2)}{\frac{2*a^*}{S_i} - \frac{(1-\nu ind^2)}{E_{ind}}}$$

Observação: O parâmetro a^* é calculado pela equação:

$$a^* = \sqrt{\frac{5(2 - n)}{2(4 + n)} ((2 * R_{ind} * h_c^*) - h_c^{*2})}$$

4. Calcular coluna de $\ln$ de h_c^* multiplicado por 1000.
5. Calcular coluna de $\ln$ de E_D .
6. Ajustar reta de $\ln$ de E_D em função de $\ln h_c^*$.

Observação: Os cálculos até o passo 6 são feitos para os 12 ciclos de indentação.

APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – ETAPAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

7. Calcular o valor de D^* utilizando o valor de f^* (0,11).

$$D^* = \frac{\pi}{\left(\frac{4\pi}{3}\right)^{2/3}} * f^{*2/3}$$

8. Calcular o valor de E_D^* utilizando o valor do módulo de elasticidade do material virgem E_0 .

$$E_D^* = E(1 - D^*)$$

9. Calcular o ln de E_D^* .

10. Calcular o ln de h^* por meio da reta ajustada no passo 6.

$$LN(h^*) = \frac{LN(E_D^*) - coef\ linear}{coef\ angular}$$

11. Calcular valor de h^* , conforme a equação abaixo:

$$h^* = (2,718^{\ln(h^*)})/1000$$

12. Calcular valor de h^* sobre o raio do indentador (h^*/R_{ind}).

APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – ETAPAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

13. Ajustar uma curva de P_{mi} em função de h/R_{ind} (curva potência no Microsoft Excel).

Observação: P_{mi} é calculado de seguinte forma para os 12 ciclos de indentação:

$$P_{mi} = \frac{P_{maxi}}{\pi * a^{*2}}$$

Observação: $(h/R_{ind})_i$ é calculado da seguinte forma:

$$\frac{h}{R}_i = \frac{h_{maxi}}{R_{ind}}$$

14. Inserir o valor encontrado de (h^*/R_{ind}) na equação da curva gerada no passo 13 (substituir x da equação pelo valor de (h^*/R_{ind}) para se obter o valor de P_m^*).

15. Multiplicar o valor de P_m^* por h^* para resolver a integral característica da metodologia de Lee et al. (2006). O valor obtido corresponde a $2Wf$.

16. Calcular K_{Jc} por meio da expressão:

$$K_{Jc} = \sqrt{2Ewf}$$

APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – ETAPAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

Metodologia de Zhang, Wang e Wang (2019a):

1. Calcular U_{Di} de acordo com a expressão abaixo:

$$U_{Di} = \frac{1}{2} \cdot P_{maxi} \cdot \left(h_{maxi} - h_{pi} - \frac{P_{maxi}}{2 \cdot \sqrt{\frac{(h_{maxi}-h_{pi}) \cdot R_{ind} \cdot \left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right)}{\left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right) - R_{ind}}}} \right) \cdot \frac{(1-\nu^2)}{E_0} + \frac{(1-\nu_{ind}^2)}{E_{ind}} \right)$$

2. Calcular A_{eqi} conforme a seguinte equação:

$$A_{eqi} = \pi \cdot \frac{(h_{maxi} - h_{pi}) R_{ind} \left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right)}{\left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right) - R_{ind}} \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{(1-\nu^2)}{\frac{(h_{maxi}-h_{pi}) \cdot R_{ind} \cdot \left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right)}{2 \cdot \sqrt{\frac{(h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}})}{\left(\frac{h_{pi}^2 + (2 \cdot h_{maxi} \cdot R_{ind} - h_{maxi}^2)}{2 \cdot h_{pi}} \right) - R_{ind}}}} \right) \cdot \frac{(1-\nu_{ind}^2)}{E_{ind}}}{s_i \cdot E_0} \right]$$

3. Ajustar a reta de U_{Di} em função de A_{eqi} .

4. Coletar o valor do coeficiente angular da reta A_{eqi} x U_{Di} . Este valor corresponde a J_{SIT} .

APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – ETAPAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

5. Calcular KIIC pela equação seguinte:

$$K_{IIC} = \sqrt{\frac{E_0}{1 - \nu^2} \cdot J_{SIT}}$$

6. Determinar a tenacidade à fratura KIC pela expressão:

$$K_{IC} = \frac{K_{IIC}}{\alpha}$$

APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – ETAPAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

Metodologia de Yu et al. (2023):

1. Estimar η de acordo com a expressão abaixo:

$$\eta = \frac{(P_{max12}/4a^2)}{(a/R_{ind})^{M-2}}$$

Observação: a variável a é obtida pela equação:

$$a = \sqrt{\frac{5(2-n)}{2(4+n)} \left(2R_{ind} \left(h_{maxi} - \omega \frac{P_{maxi}}{S_i} \right) - \left(h_{maxi} - \omega \frac{P_{maxi}}{S_i} \right)^2 \right)}$$

2. Calcular P_m^{cr} pela equação seguinte:

$$P_m^{cr} = \beta \cdot \eta \left(n^2 \left(a_1 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right)^2 + a_2 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right) + a_3 \right) + n \left(b_1 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right)^2 + b_2 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right) + b_3 \right) + \left(c_1 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right)^2 + c_2 \left(\frac{E_0}{\beta \cdot \eta} \right) + c_3 \right) \right)$$

3. Estimar h_c^* para os 12 ciclos de indentação conforme a equação abaixo:

$$h_c^* = h_{max} - \omega \frac{P_{maxi}}{S_i}$$

4. Calcular P_m para os 12 ciclos de indentação conforme a seguinte equação:

$$P_m = \frac{P_{maxi}}{A_C} = \frac{P_{maxi}}{\pi \cdot a^2}$$

APÊNDICE II (CONTINUAÇÃO) – ETAPAS PARA O CÁLCULO DA TENACIDADE À FRATURA PELAS DIFERENTES METODOLOGIAS

5. Elaborar o gráfico de P_m em função de h_c^* contendo os 12 pontos referentes aos ciclos de indentação e a coordenada (0,0).
6. Definir por meio do gráfico do item anterior o valor de h_{cr}^* , com base em P_m^{cr} .
7. Calcular $J_{Ic,IT}$ pela multiplicação dos valores de P_m^{cr} e h_{cr}^* .
8. Estimar $K_{Jc,IT}$ de acordo com a seguinte expressão:

$$K_{Jc,IT} = \sqrt{0,001 \cdot E_0 \cdot \frac{J_{Ic,IT}}{(1 - \nu^2)}}$$

9. Calcular a tenacidade à fratura K_{IC} conforme a equação:

$$K_{IC} = \frac{K_{Jc,IT}}{\alpha}$$

APÊNDICE III – CÓDIGO EM MATLAB PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA DA TENACIDADE À FRATURA OBTIDA PELA METODOLOGIA DE LEE et al. (2006)

```
% Rotina de leitura do arquivo de texto com os dados
```

```
fileID = fopen('dados3.txt','r');
```

```
formatSpec = '%f %f %f %f %f %d';
```

```
sizeA = [6 9050];
```

```
Dados = fscanf(fileID,formatSpec,sizeA);
```

```
transpose(Dados);
```

```
Rind=0.383333333333;
```

```
vind=0.23;
```

```
Eind=710000;
```

```
v=0.3;
```

```
E0=210241.66;
```

```
omega=0.75;
```

```
n=0.1;
```

```
f=0.11;
```

```
NumIter=100;
```

```
Res_Fmax=0.001; % Resolução da célula de carga
```

```
Res_Profmax=0.0001; % resolução do LVDT
```

```
calib_Fmax=2*Res_Fmax; % Incerteza da calibração da célula de carga
```

```
calib_Profmax=0.5*Res_Profmax; % Incerteza da calibração do LVDT
```

```
k_Fmax_calib=2; %Fator de abrangência da calibração da célula de carga
```

```
k_Profmax_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do LVDT
```

% Leituras do raio do indentador Rind

Rind_leitura(1)=0.38235;

Rind_leitura(2)=0.38235;

Rind_leitura(3)=0.38530;

DesvPad_Rind=std(Rind_leitura);

Rind_res=0.0001;

calib_Rind=2*Rind_res; % Incerteza da calibração do Raio do Indentador

k_Rind_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do Raio do Indentador

% Leituras do módulo de elasticidade E0

E0_leitura(1)=209878.8;

E0_leitura(2)=208656.7;

E0_leitura(3)=210452.7;

E0_leitura(4)=211255.1;

E0_leitura(5)=210965.0;

DesvPad_E0=std(E0_leitura);

E0_res=0.1;

calib_E0=0.0013*mean(E0_leitura); % Incerteza da calibração do Raio do Indentador

k_E0_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do Raio do Indentador

%%
 %%%

%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 12

Ciclo_br = Dados(6,:);

Ciclo = transpose(Ciclo_br);

Forca_br = Dados(3,:);

```

Forca = transpose(Forca_br);
MatForca = [Forca Ciclo];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

[MaxForca12,IForca12] = max(MatForca(1:size(MatForca)));

LimInfForca12 = IForca12-7;
LimSupForca12 = IForca12+7;

Fmax(1:12)=0;
Fmax(12) = MaxForca12;

%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 12
VetForca12 = Forca(LimInfForca12:LimSupForca12);

DesvPad_VetForca12 = std(VetForca12);
DesvPad_Fmax(1:12)=0;
DesvPad_Fmax(12)=DesvPad_VetForca12;

%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 12
MatForca1=size(MatForca);
MatForca2=MatForca1(1);
for i = 1:MatForca2
    if MatForca(i,2) == 12;
        MatForca(i,1) = 0;
    end
end

%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 12
Ciclo_br = Dados(6,:);
Ciclo = transpose(Ciclo_br);
Prof_br = Dados(2,:);
Prof = transpose(Prof_br);

```

```
MatProf = [Prof Ciclo];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxProf12,IProf12] = max(Prof);
```

```
LimInfProf12 = IProf12-7;
```

```
LimSupProf12 = IProf12+7;
```

```
Profmax(1:12)=0;
```

```
Profmax(12) = MaxProf12;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 12
```

```
VetProf12 = Prof(LimInfProf12:LimSupProf12);
```

```
DesvPad_VetProf12 = std(VetProf12);
```

```
DesvPad_Profmax(1:12)=0;
```

```
DesvPad_Profmax(12)=DesvPad_VetProf12;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 12
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 12;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 12 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si12 = IProf12+200;
```

```
VetSiProf12 = Prof(IProf12:Lim_Si12);
```

```
VetSiForca12 = Forca(IProf12:Lim_Si12);
```

```
regressao_12 = polyfit(VetSiProf12,VetSiForca12,1);
```

```
Si_12 = regressao_12(1);
```

```
CoefLin_12 = regressao_12(2);
```

```
hpi_12 = -1*CoefLin_12/Si_12;
```

```
Si(1:12)=0;
```

```
Si(12)=Si_12;
```

```
hpi(1:12)=0;
```

```
hpi(12)=hpi_12;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 12
```

```
aeffi_12_01=(hpi(12)^2+(2*Profmax(12)*Rind-Profmax(12)^2)/(2*hpi(12)));
```

```
aeffi_01(1:12)=0;
```

```
aeffi_01(12)=aeffi_12_01;
```

```
aeffi_12_02=((Profmax(12)-hpi(12))*Rind*aeffi_01(12))/(aeffi_01(12)-Rind);
```

```
aeffi_02(1:12)=0;
```

```
aeffi_02(12)=aeffi_12_02;
```

```
aeffi_12_FINAL=sqrt(aeffi_02(12));
```

```
aeffi_FINAL(1:12)=0;
```

```
aeffi_FINAL(12)=aeffi_12_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 12
```

```
Eeffi_12=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(12)/Si(12)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(1:12)=0;
```

```
Effi(12)=Effi_12;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 12
```

```
Di_12=1-(Effi(12)/E0);
```

```
Di(1:12)=0;
```

```
Di(12)=Di_12;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 12
```

```
S0i_12=(2*aeffi_FINAL(12))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
```

```
S0i(1:12)=0;
```

```
S0i(12)=S0i_12;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 12
```

```
Aeqi_12=3.14159265359*(aeffi_FINAL(12)^2)*Di(12);
```

```
Aeqi(1:12)=0;
```

```
Aeqi(12)=Aeqi_12;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 12
```

```
Udi_12=0.5*Fmax(12)*(Profmax(12)-hpi(12)-(Fmax(12)/S0i(12)));
```

```
Udi(1:12)=0;
```

```
Udi(12)=Udi_12;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca11,IForca11] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca11 = IForca11-7;
```

```
LimSupForca11 = IForca11+7;
```

```
Fmax(11) = MaxForca11;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 11
```

```
VetForca11 = Forca(LimInfForca11:LimSupForca11);
```

```
DesvPad_VetForca11 = std(VetForca11);
```

```
DesvPad_Fmax(11)=DesvPad_VetForca11;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 11
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 11;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 11
```

```
[MaxProf11,IProf11] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf11 = IProf11-7;
```

```
LimSupProf11 = IProf11+7;
```

```
Profmax(11) = MaxProf11;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 11
```

```
VetProf11 = Prof(LimInfProf11:LimSupProf11);
```

```
DesvPad_VetProf11 = std(VetProf11);
```



```
DesvPad_Profmax(11)=DesvPad_VetProf11;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 11
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 11;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 11 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si11 = IProf11+200;
```

```
VetSiProf11 = Prof(IProf11:Lim_Si11);
```

```
VetSiForca11 = Forca(IProf11:Lim_Si11);
```

```
regressao_11 = polyfit(VetSiProf11,VetSiForca11,1);
```

```
Si_11 = regressao_11(1);
```

```
CoefLin_11 = regressao_11(2);
```

```
hpi_11 = -1*CoefLin_11/Si_11;
```

```
Si(11)=Si_11;
```

```
hpi(11)=hpi_11;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 11
```

```
aeffi_11_01=(hpi(11)^2+(2*Profmax(11)*Rind-Profmax(11)^2))/(2*hpi(11));
```

```
aeffi_01(11)=aeffi_11_01;
```

```
aeffi_11_02=((Profmax(11)-hpi(11))*Rind*aeffi_01(11))/(aeffi_01(11)-Rind);
aeffi_02(11)=aeffi_11_02;
```

```
aeffi_11_FINAL=sqrt(aeffi_02(11));
aeffi_FINAL(11)=aeffi_11_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 11
```

```
Eeffi_11=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(11)/Si(11)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(11)=Eeffi_11;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 11
```

```
Di_11=1-(Eeffi(11)/E0);
Di(11)=Di_11;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 11
```

```
S0i_11=(2*aeffi_FINAL(11))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(11)=S0i_11;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 11
```

```
Aeqi_11=3.14159265359*(aeffi_FINAL(11)^2)*Di(11);
Aeqi(11)=Aeqi_11;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 11
```

```
Udi_11=0.5*Fmax(11)*(Profmax(11)-hpi(11)-(Fmax(11)/S0i(11)));
Udi(11)=Udi_11;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
[MaxForca10,IForca10] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca10 = IForca10-7;
```

```
LimSupForca10 = IForca10+7;
```

```
Fmax(10) = MaxForca10;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 10
```

```
VetForca10 = Forca(LimInfForca10:LimSupForca10);
```

```
DesvPad_VetForca10 = std(VetForca10);
```

```
DesvPad_Fmax(10)=DesvPad_VetForca10;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 10
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 10;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
[MaxProf10,IProf10] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf10 = IProf10-7;
```

```
LimSupProf10 = IProf10+7;
```

```
Profmax(10) = MaxProf10;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 10
```

```
VetProf10 = Prof(LimInfProf10:LimSupProf10);
```

```
DesvPad_VetProf10 = std(VetProf10);
```

```
DesvPad_Profmax(10)=DesvPad_VetProf10;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 10
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 10;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 10 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si10 = IProf10+200;
```

```
VetSiProf10 = Prof(IProf10:Lim_Si10);
```

```
VetSiForca10 = Forca(IProf10:Lim_Si10);
```

```
regressao_10 = polyfit(VetSiProf10,VetSiForca10,1);
```

```
Si_10 = regressao_10(1);
```

```
CoefLin_10 = regressao_10(2);
```

```
hpi_10 = -1*CoefLin_10/Si_10;
```

```
Si(10)=Si_10;
```

```
hpi(10)=hpi_10;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 10
```

```
aeffi_10_01=(hpi(10)^2+(2*Profmax(10)*Rind-Profmax(10)^2)/(2*hpi(10)));
```

```
aeffi_01(10)=aeffi_10_01;
```

```
aeffi_10_02=((Profmax(10)-hpi(10))*Rind*aeffi_01(10))/(aeffi_01(10)-Rind);
```

```
aeffi_02(10)=aeffi_10_02;
```

```
aeffi_10_FINAL=sqrt(aeffi_02(10));
```

```
aeffi_FINAL(10)=aeffi_10_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 10
```

```
Eeffi_10=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(10)/Si(10)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(10)=Eeffi_10;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 10
```

```
Di_10=1-(Eeffi(10)/E0);
```

```
Di(10)=Di_10;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 10
```

```
S0i_10=(2*aeffi_FINAL(10))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
```

```
S0i(10)=S0i_10;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 10
```

```
Aeqi_10=3.14159265359*(aeffi_FINAL(10)^2)*Di(10);
Aeqi(10)=Aeqi_10;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 10
```

```
Udi_10=0.5*Fmax(10)*(Profmax(10)-hpi(10)-(Fmax(10)/S0i(10)));
Udi(10)=Udi_10;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca09,IForca09] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca09 = IForca09-7;
LimSupForca09 = IForca09+7;
```

```
Fmax(09) = MaxForca09;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 09
VetForca09 = Forca(LimInfForca09:LimSupForca09);
```

```
DesvPad_VetForca09 = std(VetForca09);
DesvPad_Fmax(09)=DesvPad_VetForca09;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 09
```

```
MatForca1=size(MatForca);
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
    if MatForca(i,2) == 9;
        MatForca(i,1) = 0;
    end
```

end

[MaxProf09,IProf09] = max(MatProf(1:size(MatProf)));

LimInfProf09 = IProf09-7;

LimSupProf09 = IProf09+7;

Profmax(09) = MaxProf09;

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 09

VetProf09 = Prof(LimInfProf09:LimSupProf09);

DesvPad_VetProf09 = std(VetProf09);

DesvPad_Profmax(09)=DesvPad_VetProf09;

%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 09

MatProf1=size(MatProf);

MatProf2=MatProf1(1);

for i = 1:MatProf2

if MatProf(i,2) == 9;

MatProf(i,1) = 0;

end

end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 09 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si09 = IProf09+200;

VetSiProf09 = Prof(IProf09:Lim_Si09);

VetSiForca09 = Forca(IProf09:Lim_Si09);

regressao_09 = polyfit(VetSiProf09,VetSiForca09,1);

Si_09 = regressao_09(1);

```
CoefLin_09 = regressao_09(2);
```

```
hpi_09 = -1*CoefLin_09/Si_09;
```

```
Si(09)=Si_09;
```

```
hpi(09)=hpi_09;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 09
```

```
aeffi_09_01=(hpi(09)^2+(2*Profmax(09)*Rind-Profmax(09)^2)/(2*hpi(09)));
```

```
aeffi_01(09)=aeffi_09_01;
```

```
aeffi_09_02=((Profmax(09)-hpi(09))*Rind*aeffi_01(09))/(aeffi_01(09)-Rind);
```

```
aeffi_02(09)=aeffi_09_02;
```

```
aeffi_09_FINAL=sqrt(aeffi_02(09));
```

```
aeffi_FINAL(09)=aeffi_09_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 09
```

```
Eeffi_09=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(09)/Si(09)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(09)=Eeffi_09;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 09
```

```
Di_09=1-(Eeffi(09)/E0);
```

```
Di(09)=Di_09;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 09
```



```
S0i_09=(2*aeffi_FINAL(09))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(09)=S0i_09;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 09
```

```
Aeqi_09=3.14159265359*(aeffi_FINAL(09)^2)*Di(09);
Aeqi(09)=Aeqi_09;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 09
```

```
Udi_09=0.5*Fmax(09)*(Profmax(09)-hpi(09)-(Fmax(09)/S0i(09)));
Udi(09)=Udi_09;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca08,IForca08] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca08 = IForca08-7;
```

```
LimSupForca08 = IForca08+7;
```

```
Fmax(08) = MaxForca08;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 08
```

```
VetForca08 = Forca(LimInfForca08:LimSupForca08);
```

```
DesvPad_VetForca08 = std(VetForca08);
```

```
DesvPad_Fmax(08)=DesvPad_VetForca08;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 08
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 8;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
[MaxProf08,IProf08] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf08 = IProf08-7;
```

```
LimSupProf08 = IProf08+7;
```

```
Profmax(08) = MaxProf08;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 08
```

```
VetProf08 = Prof(LimInfProf08:LimSupProf08);
```

```
DesvPad_VetProf08 = std(VetProf08);
```

```
%DesvPad_Profmax(1:12)=0; % Não repetir
```

```
DesvPad_Profmax(08)=DesvPad_VetProf08;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 08
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 8;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 08 (coeficiente angular da reta)
```

```

Lim_Si08 = IProf08+200;
VetSiProf08 = Prof(IProf08:Lim_Si08);
VetSiForca08 = Forca(IProf08:Lim_Si08);

regressao_08 = polyfit(VetSiProf08,VetSiForca08,1);

Si_08 = regressao_08(1);
CoefLin_08 = regressao_08(2);

hpi_08 = -1*CoefLin_08/Si_08;

Si(08)=Si_08;

hpi(08)=hpi_08;

%Cálculo de aeffi do ciclo 08

aeffi_08_01=(hpi(08)^2+(2*Profmax(08)*Rind-Profmax(08)^2))/(2*hpi(08));
aeffi_01(08)=aeffi_08_01;

aeffi_08_02=((Profmax(08)-hpi(08))*Rind*aeffi_01(08))/(aeffi_01(08)-Rind);
aeffi_02(08)=aeffi_08_02;

aeffi_08_FINAL=sqrt(aeffi_02(08));
aeffi_FINAL(08)=aeffi_08_FINAL;

%Cálculo de Eeffi do ciclo 08

Eeffi_08=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(08)/Si(08)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(08)=Eeffi_08;

%Cálculo de Di do ciclo 08

```

```
Di_08=1-(Eeffi(08)/E0);
```

```
Di(08)=Di_08;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 08
```

```
S0i_08=(2*aeffi_FINAL(08))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
```

```
S0i(08)=S0i_08;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 08
```

```
Aeqi_08=3.14159265359*(aeffi_FINAL(08)^2)*Di(08);
```

```
Aeqi(08)=Aeqi_08;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 08
```

```
Udi_08=0.5*Fmax(08)*(Profmax(08)-hpi(08)-(Fmax(08)/S0i(08)));
```

```
Udi(08)=Udi_08;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca07,IForca07] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca07 = IForca07-7;
```

```
LimSupForca07 = IForca07+7;
```

```
%Fmax(1:12)=0; %%%%% Não repetir
```

```
Fmax(07) = MaxForca07;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 07
```

```
VetForca07 = Forca(LimInfForca07:LimSupForca07);
```

```
DesvPad_VetForca07 = std(VetForca07);
```

```
DesvPad_Fmax(07)=DesvPad_VetForca07;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 07
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 7;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
[MaxProf07,IProf07] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf07 = IProf07-7;
```

```
LimSupProf07 = IProf07+7;
```

```
Profmax(07) = MaxProf07;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 07
```

```
VetProf07 = Prof(LimInfProf07:LimSupProf07);
```

```
DesvPad_VetProf07 = std(VetProf07);
```

```
DesvPad_Profmax(07)=DesvPad_VetProf07;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 07
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 7;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```

    end
end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 07 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si07 = IProf07+200;
VetSiProf07 = Prof(IProf07:Lim_Si07);
VetSiForca07 = Forca(IProf07:Lim_Si07);

regressao_07 = polyfit(VetSiProf07,VetSiForca07,1);

Si_07 = regressao_07(1);
CoefLin_07 = regressao_07(2);

hpi_07 = -1*CoefLin_07/Si_07;

Si(07)=Si_07;

hpi(07)=hpi_07;

%Cálculo de aeffi do ciclo 07

aeffi_07_01=(hpi(07)^2+(2*Profmax(07)*Rind-Profmax(07)^2)/(2*hpi(07)));
aeffi_01(07)=aeffi_07_01;

aeffi_07_02=((Profmax(07)-hpi(07))*Rind*aeffi_01(07))/(aeffi_01(07)-Rind);
aeffi_02(07)=aeffi_07_02;

aeffi_07_FINAL=sqrt(aeffi_02(07));
aeffi_FINAL(07)=aeffi_07_FINAL;

```

%Cálculo de Eeffi do ciclo 07

$E_{effi_07} = (1 - v^2) / ((2 * a_{effi_FINAL}(07) / S_i(07) - ((1 - v_{ind}^2) / E_{ind})))$;
 $E_{effi}(07) = E_{effi_07}$;

%Cálculo de Di do ciclo 07

$D_{i_07} = 1 - (E_{effi}(07) / E_0)$;
 $D_i(07) = D_{i_07}$;

% Cálculo de S0i do ciclo 07

$S_{0i_07} = (2 * a_{effi_FINAL}(07)) / ((1 - v^2) / E_0 + (1 - v_{ind}^2) / E_{ind})$;
 $S_{0i}(07) = S_{0i_07}$;

% Cálculo de Aeqi do ciclo 07

$A_{eqi_07} = 3.14159265359 * (a_{effi_FINAL}(07)^2) * D_i(07)$;
 $A_{eqi}(07) = A_{eqi_07}$;

% Cálculo de Udi do ciclo 07

$U_{di_07} = 0.5 * F_{max}(07) * (Prof_{max}(07) - h_{pi}(07) - (F_{max}(07) / S_{0i}(07)))$;
 $U_{di}(07) = U_{di_07}$;

%%
 %%%

$[MaxForca06, IForca06] = \max(MatForca(1:size(MatForca)))$;

$LimInfForca06 = IForca06 - 7$;

$LimSupForca06 = IForca06 + 7$;

```
%Fmax(1:12)=0; %%%%% Não repetir
```

```
Fmax(06) = MaxForca06;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 06
```

```
VetForca06 = Forca(LimInfForca06:LimSupForca06);
```

```
DesvPad_VetForca06 = std(VetForca06);
```

```
DesvPad_Fmax(06)=DesvPad_VetForca06;
```

```
%%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 06
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 6;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
[MaxProf06,IProf06] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf06 = IProf06-7;
```

```
LimSupProf06 = IProf06+7;
```

```
Profmax(06) = MaxProf06;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 06
```

```
VetProf06 = Prof(LimInfProf06:LimSupProf06);
```

```
DesvPad_VetProf06 = std(VetProf06);
```

```
DesvPad_Profmax(06)=DesvPad_VetProf06;
```



```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 06
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 6;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 06 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si06 = IProf06+200;
```

```
VetSiProf06 = Prof(IProf06:Lim_Si06);
```

```
VetSiForca06 = Forca(IProf06:Lim_Si06);
```

```
regressao_06 = polyfit(VetSiProf06,VetSiForca06,1);
```

```
Si_06 = regressao_06(1);
```

```
CoefLin_06 = regressao_06(2);
```

```
hpi_06 = -1*CoefLin_06/Si_06;
```

```
Si(06)=Si_06;
```

```
hpi(06)=hpi_06;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 06
```

```
aeffi_06_01=(hpi(06)^2+(2*Profmax(06)*Rind-Profmax(06)^2))/(2*hpi(06));
```

```
aeffi_01(06)=aeffi_06_01;
```

```
aeffi_06_02=((Profmax(06)-hpi(06))*Rind*aeffi_01(06))/(aeffi_01(06)-Rind);
```

```
aeffi_02(06)=aeffi_06_02;
```

```
aeffi_06_FINAL=sqrt(aeffi_02(06));
```

```
aeffi_FINAL(06)=aeffi_06_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 06
```

```
Eeffi_06=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(06)/Si(06)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(06)=Eeffi_06;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 06
```

```
Di_06=1-(Eeffi(06)/E0);
```

```
Di(06)=Di_06;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 06
```

```
S0i_06=(2*aeffi_FINAL(06))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
```

```
S0i(06)=S0i_06;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 06
```

```
Aeqi_06=3.14159265359*(aeffi_FINAL(06)^2)*Di(06);
```

```
Aeqi(06)=Aeqi_06;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 06
```

```
Udi_06=0.5*Fmax(06)*(Profmax(06)-hpi(06)-(Fmax(06)/S0i(06)));
```

```
Udi(06)=Udi_06;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca05,IForca05] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca05 = IForca05-7;
```

```
LimSupForca05 = IForca05+7;
```

```
Fmax(05) = MaxForca05;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 05
```

```
VetForca05 = Forca(LimInfForca05:LimSupForca05);
```

```
DesvPad_VetForca05 = std(VetForca05);
```

```
DesvPad_Fmax(05)=DesvPad_VetForca05;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 05
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 5;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
[MaxProf05,IProf05] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf05 = IProf05-7;
```

```
LimSupProf05 = IProf05+7;
```

```
Profmax(05) = MaxProf05;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 05
```

```
VetProf05 = Prof(LimInfProf05:LimSupProf05);
```

```
DesvPad_VetProf05 = std(VetProf05);
```

```
%DesvPad_Profmax(1:12)=0; % Não repetir
```

```
DesvPad_Profmax(05)=DesvPad_VetProf05;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 05
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 5;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 05 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si05 = IProf05+200;
```

```
VetSiProf05 = Prof(IProf05:Lim_Si05);
```

```
VetSiForca05 = Forca(IProf05:Lim_Si05);
```

```
regressao_05 = polyfit(VetSiProf05,VetSiForca05,1);
```

```
Si_05 = regressao_05(1);
```

```
CoefLin_05 = regressao_05(2);
```

```
hpi_05 = -1*CoefLin_05/Si_05;
```

```
Si(05)=Si_05;
```

```
hpi(05)=hpi_05;
```

%Cálculo de aeffi do ciclo 05

$$aeffi_05_01 = (hpi(05)^2 + (2 * Profmax(05) * Rind - Profmax(05)^2)) / (2 * hpi(05));$$

$$aeffi_01(05) = aeffi_05_01;$$

$$aeffi_05_02 = ((Profmax(05) - hpi(05)) * Rind * aeffi_01(05)) / (aeffi_01(05) - Rind);$$

$$aeffi_02(05) = aeffi_05_02;$$

$$aeffi_05_FINAL = \sqrt{aeffi_02(05)};$$

$$aeffi_FINAL(05) = aeffi_05_FINAL;$$

%Cálculo de Eeffi do ciclo 05

$$Eeffi_05 = (1 - v^2) / ((2 * aeffi_FINAL(05) / Si(05) - ((1 - v_{ind}^2) / E_{ind})));$$

$$Eeffi(05) = Eeffi_05;$$

%Cálculo de Di do ciclo 05

$$Di_05 = 1 - (Eeffi(05) / E0);$$

$$Di(05) = Di_05;$$

% Cálculo de S0i do ciclo 05

$$S0i_05 = (2 * aeffi_FINAL(05)) / ((1 - v^2) / E0 + (1 - v_{ind}^2) / E_{ind});$$

$$S0i(05) = S0i_05;$$

% Cálculo de Aeqi do ciclo 05

$$Aeqi_05 = 3.14159265359 * (aeffi_FINAL(05)^2) * Di(05);$$

$$Aeqi(05) = Aeqi_05;$$

% Cálculo de Udi do ciclo 05

Udi_05=0.5*Fmax(05)*(Profmax(05)-hpi(05)-(Fmax(05)/S0i(05)));

Udi(05)=Udi_05;

%%
 %%%

[MaxForca04,IForca04] = max(MatForca(1:size(MatForca)));

LimInfForca04 = IForca04-7;

LimSupForca04 = IForca04+7;

%Fmax(1:12)=0; %%%%% Não repetir

Fmax(04) = MaxForca04;

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 04

VetForca04 = Forca(LimInfForca04:LimSupForca04);

DesvPad_VetForca04 = std(VetForca04);

DesvPad_Fmax(04)=DesvPad_VetForca04;

%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 04

MatForca1=size(MatForca);

MatForca2=MatForca1(1);

for i = 1:MatForca2

 if MatForca(i,2) == 4;

 MatForca(i,1) = 0;

 end

end

```
[MaxProf04,IProf04] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf04 = IProf04-7;
```

```
LimSupProf04 = IProf04+7;
```

```
Profmax(04) = MaxProf04;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 04
```

```
VetProf04 = Prof(LimInfProf04:LimSupProf04);
```

```
DesvPad_VetProf04 = std(VetProf04);
```

```
DesvPad_Profmax(04)=DesvPad_VetProf04;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 04
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 4;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 04 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si04 = IProf04+200;
```

```
VetSiProf04 = Prof(IProf04:Lim_Si04);
```

```
VetSiForca04 = Forca(IProf04:Lim_Si04);
```

```
regressao_04 = polyfit(VetSiProf04,VetSiForca04,1);
```

```
Si_04 = regressao_04(1);
```

```
CoefLin_04 = regressao_04(2);
```

```
hpi_04 = -1*CoefLin_04/Si_04;
```

```
Si(04)=Si_04;
```

```
hpi(04)=hpi_04;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 04
```

```
aeffi_04_01=(hpi(04)^2+(2*Profmax(04)*Rind-Profmax(04)^2)/(2*hpi(04)));
```

```
aeffi_01(04)=aeffi_04_01;
```

```
aeffi_04_02=((Profmax(04)-hpi(04))*Rind*aeffi_01(04))/(aeffi_01(04)-Rind);
```

```
aeffi_02(04)=aeffi_04_02;
```

```
aeffi_04_FINAL=sqrt(aeffi_02(04));
```

```
aeffi_FINAL(04)=aeffi_04_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 04
```

```
Eeffi_04=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(04)/Si(04)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(04)=Eeffi_04;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 04
```

```
Di_04=1-(Eeffi(04)/E0);
```

```
Di(04)=Di_04;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 04
```

```
S0i_04=(2*aeffi_FINAL(04))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
```

```
S0i(04)=S0i_04;
```


% Cálculo de Aeqi do ciclo 04

Aeqi_04=3.14159265359*(aeffi_FINAL(04)^2)*Di(04);

Aeqi(04)=Aeqi_04;

% Cálculo de Udi do ciclo 04

Udi_04=0.5*Fmax(04)*(Profmax(04)-hpi(04)-(Fmax(04)/S0i(04)));

Udi(04)=Udi_04;

%%
 %%%

[MaxForca03,IForca03] = max(MatForca(1:size(MatForca)));

LimInfForca03 = IForca03-7;

LimSupForca03 = IForca03+7;

%Fmax(1:12)=0; %%%%% Não repetir

Fmax(03) = MaxForca03;

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 03

VetForca03 = Forca(LimInfForca03:LimSupForca03);

DesvPad_VetForca03 = std(VetForca03);

DesvPad_Fmax(03)=DesvPad_VetForca03;

%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 03

MatForca1=size(MatForca);

MatForca2=MatForca1(1);

for i = 1:MatForca2

 if MatForca(i,2) == 3;

```

        MatForca(i,1) = 0;
    end
end

[MaxProf03,IProf03] = max(MatProf(1:size(MatProf)));

LimInfProf03 = IProf03-7;
LimSupProf03 = IProf03+7;

Profmax(03) = MaxProf03;

%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 03
VetProf03 = Prof(LimInfProf03:LimSupProf03);

DesvPad_VetProf03 = std(VetProf03);
DesvPad_Profmax(03)=DesvPad_VetProf03;

%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 03
MatProf1=size(MatProf);
MatProf2=MatProf1(1);
for i = 1:MatProf2
    if MatProf(i,2) == 3;
        MatProf(i,1) = 0;
    end
end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 03 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si03 = IProf03+200;
VetSiProf03 = Prof(IProf03:Lim_Si03);
VetSiForca03 = Forca(IProf03:Lim_Si03);

regressao_03 = polyfit(VetSiProf03,VetSiForca03,1);

```

```
Si_03 = regressao_03(1);
```

```
CoefLin_03 = regressao_03(2);
```

```
hpi_03 = -1*CoefLin_03/Si_03;
```

```
Si(03)=Si_03;
```

```
hpi(03)=hpi_03;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 03
```

```
aeffi_03_01=(hpi(03)^2+(2*Profmax(03)*Rind-Profmax(03)^2)/(2*hpi(03)));
```

```
aeffi_01(03)=aeffi_03_01;
```

```
aeffi_03_02=((Profmax(03)-hpi(03))*Rind*aeffi_01(03))/(aeffi_01(03)-Rind);
```

```
aeffi_02(03)=aeffi_03_02;
```

```
aeffi_03_FINAL=sqrt(aeffi_02(03));
```

```
aeffi_FINAL(03)=aeffi_03_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 03
```

```
Eeffi_03=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(03)/Si(03)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(03)=Eeffi_03;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 03
```

```
Di_03=1-(Eeffi(03)/E0);
```

```
Di(03)=Di_03;
```

% Cálculo de S0i do ciclo 03

```
S0i_03=(2*aeffi_FINAL(03))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(03)=S0i_03;
```

% Cálculo de Aeqi do ciclo 03

```
Aeqi_03=3.14159265359*(aeffi_FINAL(03)^2)*Di(03);
Aeqi(03)=Aeqi_03;
```

% Cálculo de Udi do ciclo 03

```
Udi_03=0.5*Fmax(03)*(Profmax(03)-hpi(03)-(Fmax(03)/S0i(03)));
Udi(03)=Udi_03;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca02,IForca02] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca02 = IForca02-7;
```

```
LimSupForca02 = IForca02+7;
```

```
%Fmax(1:12)=0; %%%% Não repetir
```

```
Fmax(02) = MaxForca02;
```

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 02

```
VetForca02 = Forca(LimInfForca02:LimSupForca02);
```

```
DesvPad_VetForca02 = std(VetForca02);
```

```
DesvPad_Fmax(02)=DesvPad_VetForca02;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 02
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 2;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
[MaxProf02,IProf02] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf02 = IProf02-7;
```

```
LimSupProf02 = IProf02+7;
```

```
%Profmax(1:12)=0; %%%%% Não repetir
```

```
Profmax(02) = MaxProf02;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 02
```

```
VetProf02 = Prof(LimInfProf02:LimSupProf02);
```

```
DesvPad_VetProf02 = std(VetProf02);
```

```
%DesvPad_Profmax(1:12)=0; % Não repetir
```

```
DesvPad_Profmax(02)=DesvPad_VetProf02;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 02
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 2;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 02 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si02 = IProf02+200;

VetSiProf02 = Prof(IProf02:Lim_Si02);

VetSiForca02 = Forca(IProf02:Lim_Si02);

regressao_02 = polyfit(VetSiProf02,VetSiForca02,1);

Si_02 = regressao_02(1);

CoefLin_02 = regressao_02(2);

hpi_02 = -1*CoefLin_02/Si_02;

Si(02)=Si_02;

hpi(02)=hpi_02;

%Cálculo de aeffi do ciclo 02

aeffi_02_01=(hpi(02)^2+(2*Profmax(02)*Rind-Profmax(02)^2)/(2*hpi(02)));

aeffi_01(02)=aeffi_02_01;

aeffi_02_02=((Profmax(02)-hpi(02))*Rind*aeffi_01(02))/(aeffi_01(02)-Rind);

aeffi_02(02)=aeffi_02_02;

aeffi_02_FINAL=sqrt(aeffi_02(02));

aeffi_FINAL(02)=aeffi_02_FINAL;

%Cálculo de Eeffi do ciclo 02

```

Effi_02=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(02)/Si(02)-((1-vind^2)/Eind)));
Effi(02)=Effi_02;

```

```

%Cálculo de Di do ciclo 02

```

```

Di_02=1-(Effi(02)/E0);
Di(02)=Di_02;

```

```

% Cálculo de S0i do ciclo 02

```

```

S0i_02=(2*aeffi_FINAL(02))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(02)=S0i_02;

```

```

% Cálculo de Aeqi do ciclo 02

```

```

Aeqi_02=3.14159265359*(aeffi_FINAL(02)^2)*Di(02);
Aeqi(02)=Aeqi_02;

```

```

% Cálculo de Udi do ciclo 02

```

```

Udi_02=0.5*Fmax(02)*(Profmax(02)-hpi(02)-(Fmax(02)/S0i(02)));
Udi(02)=Udi_02;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

[MaxForca01,IForca01] = max(MatForca(1:size(MatForca)));

```

```

LimInfForca01 = IForca01-7;
LimSupForca01 = IForca01+7;

```

```

%Fmax(1:12)=0; %%%%% Não repetir

```

```
Fmax(01) = MaxForca01;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 01
```

```
VetForca01 = Forca(LimInfForca01:LimSupForca01);
```

```
DesvPad_VetForca01 = std(VetForca01);
```

```
DesvPad_Fmax(01)=DesvPad_VetForca01;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 01
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 1;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
[MaxProf01,IProf01] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf01 = IProf01-7;
```

```
LimSupProf01 = IProf01+7;
```

```
Profmax(01) = MaxProf01;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 01
```

```
VetProf01 = Prof(LimInfProf01:LimSupProf01);
```

```
DesvPad_VetProf01 = std(VetProf01);
```

```
DesvPad_Profmax(01)=DesvPad_VetProf01;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 01
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```



```

for i = 1:MatProf2
    if MatProf(i,2) == 1;
        MatProf(i,1) = 0;
    end
end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 01 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si01 = IProf01+200;
VetSiProf01 = Prof(IProf01:Lim_Si01);
VetSiForca01 = Forca(IProf01:Lim_Si01);

regressao_01 = polyfit(VetSiProf01,VetSiForca01,1);

Si_01 = regressao_01(1);
CoefLin_01 = regressao_01(2);

hpi_01 = -1*CoefLin_01/Si_01;

Si(01)=Si_01;

hpi(01)=hpi_01;

%Cálculo de aeffi do ciclo 01

aeffi_01_01=(hpi(01)^2+(2*Profmax(01)*Rind-Profmax(01)^2))/(2*hpi(01));
aeffi_01(01)=aeffi_01_01;

aeffi_01_02=((Profmax(01)-hpi(01))*Rind*aeffi_01(01))/(aeffi_01(01)-Rind);
aeffi_02(01)=aeffi_01_02;

aeffi_01_FINAL=sqrt(aeffi_02(01));

```

```
aeffi_FINAL(01)=aeffi_01_FINAL;
```

%Cálculo de Eeffi do ciclo 01

$$\begin{aligned} \text{Effi_01} &= (1 - v^2) / ((2 * \text{aeffi_FINAL}(01) / \text{Si}(01) - ((1 - v_{\text{ind}}^2) / E_{\text{ind}}))); \\ \text{Effi}(01) &= \text{Effi_01}; \end{aligned}$$

%Cálculo de Di do ciclo 01

$$\begin{aligned} \text{Di_01} &= 1 - (\text{Effi}(01)/E0); \\ \text{Di}(01) &= \text{Di_01}; \end{aligned}$$

% Cálculo de S0i do ciclo 01

$$S0i_01 = (2 * aeffi_FINAL(01)) / ((1 - v^2) / E0 + (1 - v_{ind}^2) / E_{ind});$$

$$S0i(01) = S0i_01;$$

% Cálculo de Aeqi do ciclo 01

```
Aeqi_01=3.14159265359*(aeffi_FINAL(01)^2)*Di(01);
Aeqi(01)=Aeqi_01;
```

% Cálculo de Udi do ciclo 01

```

Udi_01=0.5*Fmax(01)*(Profmax(01)-hpi(01)-(Fmax(01)/S0i(01)));
Udi(01)=Udi_01;

```

[illegible]

% Cálculo das incertezas padrão

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 12)

$u_Fmax_leituras(1:12)=0;$

$u_Fmax_leituras(12)=DesvPad_Fmax(12)/sqrt(15);$

$u_Fmax_res(1:12)=0;$

$u_Fmax_res(12)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));$

$u_Fmax_calib(1:12)=0;$

$u_Fmax_calib(12)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(12)=sqrt(u_Fmax_leituras(12)^2+u_Fmax_res(12)^2+u_Fmax_calib(12)^2);$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 11)

$u_Fmax_leituras(11)=DesvPad_Fmax(11)/sqrt(15);$

$u_Fmax_res(11)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));$

$u_Fmax_calib(11)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(11)=sqrt(u_Fmax_leituras(11)^2+u_Fmax_res(11)^2+u_Fmax_calib(11)^2);$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 10)

$u_Fmax_leituras(10)=DesvPad_Fmax(10)/sqrt(15);$

$$u_{Fmax_res}(10) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$$
$$u_Fmax_calib(10)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;$$
$$u_Fmax(10)=\sqrt{u_Fmax_leituras(10)^2+u_Fmax_res(10)^2+u_Fmax_calib(10)^2};$$
[illegible]

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 09)

$$u_Fmax_leituras(09)=DesvPad_Fmax(09)/sqrt(15);$$
$$u_Fmax_res(09)=Res_Fmax/(2*\sqrt{3});$$

u Fmax calib(09)=calib Fmax/k Fmax calib;

$$u_{Fmax}(09) = \sqrt{u_{Fmax\ leituras}(09)^2 + u_{Fmax\ res}(09)^2 + u_{Fmax\ calib}(09)^2};$$
[illegible]

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 08)

u Fmax leituras(08)=DesvPad Fmax(08)/sqrt(15);

$$u_{Fmax_res}(08) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$$

u Fmax calib(08)=calib Fmax/k Fmax calib;

$$u_{Fmax}(08) = \sqrt{u_{Fmax\ leituras}(08)^2 + u_{Fmax\ res}(08)^2 + u_{Fmax\ calib}(08)^2};$$
[illegible]

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 07)

$u_Fmax_leituras(07) = DesvPad_Fmax(07) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(07) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(07) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(07) = \sqrt{u_Fmax_leituras(07)^2 + u_Fmax_res(07)^2 + u_Fmax_calib(07)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 07)

$u_Fmax_leituras(07) = DesvPad_Fmax(07) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(07) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(07) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(07) = \sqrt{u_Fmax_leituras(07)^2 + u_Fmax_res(07)^2 + u_Fmax_calib(07)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 06)

$u_Fmax_leituras(06) = DesvPad_Fmax(06) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(06) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(06) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(06) = \sqrt{u_Fmax_leituras(06)^2 + u_Fmax_res(06)^2 + u_Fmax_calib(06)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 05)

$u_Fmax_leituras(05) = DesvPad_Fmax(05) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(05) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(05) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(05) = \sqrt{u_Fmax_leituras(05)^2 + u_Fmax_res(05)^2 + u_Fmax_calib(05)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 04)

$u_Fmax_leituras(04) = DesvPad_Fmax(04) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(04) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(04) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(04) = \sqrt{u_Fmax_leituras(04)^2 + u_Fmax_res(04)^2 + u_Fmax_calib(04)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 03)

$u_Fmax_leituras(03) = DesvPad_Fmax(03) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(03) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

```
u_Fmax_calib(03)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;
```

```
u_Fmax(03)=sqrt(u_Fmax_leituras(03)^2+u_Fmax_res(03)^2+u_Fmax_calib(03)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 02)
```

```
u_Fmax_leituras(02)=DesvPad_Fmax(02)/sqrt(15);
```

```
u_Fmax_res(02)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Fmax_calib(02)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;
```

```
u_Fmax(02)=sqrt(u_Fmax_leituras(02)^2+u_Fmax_res(02)^2+u_Fmax_calib(02)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 01)
```

```
u_Fmax_leituras(01)=DesvPad_Fmax(01)/sqrt(15);
```

```
u_Fmax_res(01)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Fmax_calib(01)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;
```

```
u_Fmax(01)=sqrt(u_Fmax_leituras(01)^2+u_Fmax_res(01)^2+u_Fmax_calib(01)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 12)
```

```
u_Profmax_leituras(1:12)=0;
```

```
u_Profmax_leituras(12)=DesvPad_Profmax(12)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(1:12)=0;
```

```
u_Profmax_res(12)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(1:12)=0;
```

```
u_Profmax_calib(12)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(12)=sqrt(u_Profmax_leituras(12)^2+u_Profmax_res(12)^2+u_Profmax_calib(12)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 11)
```

```
u_Profmax_leituras(11)=DesvPad_Profmax(11)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(11)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(11)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(11)=sqrt(u_Profmax_leituras(11)^2+u_Profmax_res(11)^2+u_Profmax_calib(11)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 10)
```

```
u_Profmax_leituras(10)=DesvPad_Profmax(10)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(10)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```


$$u_Profmax_calib(10)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;$$
$$u_Profmax(10)=\sqrt{u_Profmax_leituras(10)^2+u_Profmax_res(10)^2+u_Profmax_calib(10)^2};$$
[illegible]

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 09)

u Profmax leituras(09)=DesvPad Profmax(09)/sqrt(15);

$$u_Profmax_res(09)=Res_Profmax/(2*\sqrt{3});$$
$$u_{\text{Profmax_calib}}(09) = \text{calib_Profmax} / k_{\text{Profmax_calib}};$$
$$u_Profmax(09)=\sqrt{u_Profmax_leituras(09)^2+u_Profmax_res(09)^2+u_Profmax_calib(09)^2};$$

%%%%%%%%%%

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 08)

$$u_Profmax_leituras(08) = DesvPad_Profmax(08) / \sqrt{15};$$

u Profmax res(08)=Res Profmax/(2*sqrt(3));

u Profmax calib(08)=calib Profmax/k Profmax calib;

$$u_Profmax(08)=\sqrt{u_Profmax_leituras(08)^2+u_Profmax_res(08)^2+u_Profmax_calib(08)^2};$$

%%%%%%%%%%

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 07)

$u_Profmax_leituras(07) = DesvPad_Profmax(07) / \sqrt{15};$

$u_Profmax_res(07) = Res_Profmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Profmax_calib(07) = calib_Profmax / k_Profmax_calib;$

$u_Profmax(07) = \sqrt{u_Profmax_leituras(07)^2 + u_Profmax_res(07)^2 + u_Profmax_calib(07)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 06)

$u_Profmax_leituras(06) = DesvPad_Profmax(06) / \sqrt{15};$

$u_Profmax_res(06) = Res_Profmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Profmax_calib(06) = calib_Profmax / k_Profmax_calib;$

$u_Profmax(06) = \sqrt{u_Profmax_leituras(06)^2 + u_Profmax_res(06)^2 + u_Profmax_calib(06)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 05)

$u_Profmax_leituras(05) = DesvPad_Profmax(05) / \sqrt{15};$

$u_Profmax_res(05) = Res_Profmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Profmax_calib(05) = calib_Profmax / k_Profmax_calib;$

```
u_Profmax(05)=sqrt(u_Profmax_leituras(05)^2+u_Profmax_res(05)^2+u_Profmax_calib(05)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 04)
```

```
u_Profmax_leituras(04)=DesvPad_Profmax(04)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(04)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(04)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(04)=sqrt(u_Profmax_leituras(04)^2+u_Profmax_res(04)^2+u_Profmax_calib(04)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 03)
```

```
u_Profmax_leituras(03)=DesvPad_Profmax(03)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(03)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(03)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(03)=sqrt(u_Profmax_leituras(03)^2+u_Profmax_res(03)^2+u_Profmax_calib(03)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 02)
```

```
u_Profmax_leituras(02)=DesvPad_Profmax(02)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(02)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(02)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(02)=sqrt(u_Profmax_leituras(02)^2+u_Profmax_res(02)^2+u_Profmax_calib(02)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 01)
```

```
u_Profmax_leituras(01)=DesvPad_Profmax(01)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(01)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(01)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(01)=sqrt(u_Profmax_leituras(01)^2+u_Profmax_res(01)^2+u_Profmax_calib(01)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza Padrão de hpi
```

```
u_hpi(1:12)=0;
```

```
u_hpi(12)=0.0001*hpi(12)/sqrt(3);
```

```
u_hpi(11)=0.0001*hpi(11)/sqrt(3);
```

```
u_hpi(10)=0.0001*hpi(10)/sqrt(3);
```

```

u_hpi(09)=0.0001*hpi(09)/sqrt(3);
u_hpi(08)=0.0001*hpi(08)/sqrt(3);
u_hpi(07)=0.0001*hpi(07)/sqrt(3);
u_hpi(06)=0.0001*hpi(06)/sqrt(3);
u_hpi(05)=0.0001*hpi(05)/sqrt(3);
u_hpi(04)=0.0001*hpi(04)/sqrt(3);
u_hpi(03)=0.0001*hpi(03)/sqrt(3);
u_hpi(02)=0.0001*hpi(02)/sqrt(3);
u_hpi(01)=0.0001*hpi(01)/sqrt(3);

```

% Incerteza Padrão de Si

```

u_Si(1:12)=0;
u_Si(12)=0.0001*Si(12)/sqrt(3);
u_Si(11)=0.0001*Si(11)/sqrt(3);
u_Si(10)=0.0001*Si(10)/sqrt(3);
u_Si(09)=0.0001*Si(09)/sqrt(3);
u_Si(08)=0.0001*Si(08)/sqrt(3);
u_Si(07)=0.0001*Si(07)/sqrt(3);
u_Si(06)=0.0001*Si(06)/sqrt(3);
u_Si(05)=0.0001*Si(05)/sqrt(3);
u_Si(04)=0.0001*Si(04)/sqrt(3);
u_Si(03)=0.0001*Si(03)/sqrt(3);
u_Si(02)=0.0001*Si(02)/sqrt(3);
u_Si(01)=0.0001*Si(01)/sqrt(3);

```

% Incerteza padrão do raio do indentador Rind

```

u_Rind_leituras=DesvPad_Rind/sqrt(3);
u_Rind_res=Rind_res/(2*sqrt(3));
u_Rind_calib=calib_Rind/k_Rind_calib;

```

```
u_Rind=sqrt(u_Rind_leituras^2+u_Rind_res^2+u_Rind_calib^2);
```

```
% Incerteza padrão de vind
```

```
u_vind=0.1*vind/sqrt(3);
```

```
% Incerteza padrão de Eind
```

```
u_Eind=0.0013*Eind/sqrt(3);
```

```
% Incerteza padrão de v
```

```
u_v=0.1*v/sqrt(3);
```

```
% Incerteza padrão de E0
```

```
u_E0_leituras=DesvPad_E0/sqrt(5);
```

```
u_E0_res=E0_res/(2*sqrt(3));
```

```
u_E0_calib=calib_E0/k_Rind_calib;
```

```
u_E0=sqrt(u_E0_leituras^2+u_E0_res^2+u_E0_calib^2);
```

```
% Incerteza padrão de f
```

```
u_f=f*0.01/sqrt(3);
```

```
% Cálculo da incerteza de h_aster
```

```
u_Fmax=DesvPad_Fmax(04)/sqrt(15);
```

```
u_Rind=sqrt(((DesvPad_Rind)/sqrt(3))^2+(Rind_res/(2*sqrt(3)))^2+(calib_Rind/k_Rind_calib)^2);
```

```
u_Profmax=DesvPad_Profmax(04)/sqrt(15);
```

```
u_omega=0.01*omega/sqrt(3);
```

```
u_Si=0.0001*Si_04/sqrt(3);
```

```
u_n=0.01*n/sqrt(3);
```

```
%%% Início das simulações de Monte Carlo
```

```
% Obtenção do valor da incerteza de h_aster
```

```
MC_Profmax_04=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(04),u_Profmax);
```

```
MC_omega_04=norminv(rand(NumIter,1),omega,u_omega);
```

```
MC_Fmax_04=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(04),u_Fmax);
```

```
MC_Si_04=norminv(rand(NumIter,1),Si(04),u_Si);
```

```
MC_n_04=norminv(rand(NumIter,1),n,u_n);
```

```
u_Rind_04=sqrt(((DesvPad_Rind)/sqrt(3))^2+(Rind_res/(2*sqrt(3)))^2+(calib_Rind/k_Rind_
calib)^2);
```

```
MC_Rind_04=norminv(rand(NumIter,1),Rind,u_Rind_04);
```

```
MC_E0_04=norminv(rand(NumIter,1),E0,u_E0);
```

```
MC_f_04=norminv(rand(NumIter,1),f,u_f);
```

```
MC_v_04=norminv(rand(NumIter,1),v,u_v);
```

```
MC_vind_04=norminv(rand(NumIter,1),vind,u_vind);
```

```
MC_Eind_04=norminv(rand(NumIter,1),Eind,u_Eind);
```

```
MC_h_aster_04_Eq1=MC_Profmax_04-(MC_omega_04.*MC_Fmax_04./MC_Si_04);
```

```
u_h_aster_04=std(MC_h_aster_04_Eq1);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Obtenção do valor da incerteza de Pmi
```

```

MC_Pm_04_Eq1=((5*(2-
MC_n_04))./(2*(4+MC_n_04))).*(2.*MC_Rind_04.*(MC_Profmax_04-
MC_omega_04.*MC_Fmax_04./MC_Si_04)-(MC_Profmax_04-
MC_omega_04.*MC_Fmax_04./MC_Si_04).^2);
MC_Pm_04_Eq2=sqrt(MC_Pm_04_Eq1);
MC_Pm_04_Eq3=MC_Fmax_04./(3.141592.*(MC_Pm_04_Eq2.^2));

```

```

u_Pm_04=std(MC_Pm_04_Eq3);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Obtenção do valor da incerteza de Pmi*h_aster

```

```

MC_Pm_vezes_h_aster=MC_Pm_04_Eq3.*MC_h_aster_04_Eq1;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Obtenção do valor da incerteza de Kjc

```

```

MC_Kjc=sqrt(MC_Pm_vezes_h_aster.*MC_E0_04).*sqrt(0.001);

```

```

u_MC_Kjc=std(MC_Kjc)

```


APÊNDICE IV – CÓDIGO EM MATLAB PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA DA TENACIDADE À FRATURA OBTIDA PELA METODOLOGIA DE ZHANG, WANG E WANG (2019a)

```
% Rotina de leitura do arquivo de texto com os dados
fileID = fopen('dados3.txt','r');
formatSpec = '%f %f %f %f %f %d';
sizeA = [6 9050];
Dados = fscanf(fileID,formatSpec,sizeA);
transpose(Dados);

Rind=0.383333333333;
vind=0.23;
Eind=710000;
v=0.3;
E0=210241.66;

NumIter=1000000;

Res_Fmax=0.001; % Resolução da célula de carga
Res_Profmax=0.0001; % resolução do LVDT

calib_Fmax=2*Res_Fmax; % Incerteza da calibração da célula de carga
calib_Profmax=0.5*Res_Profmax; % Incerteza da calibração do LVDT

k_Fmax_calib=2; %Fator de abrangência da calibração da célula de carga
k_Profmax_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do LVDT

% Leituras do raio do indentador Rind

Rind_leitura(1)=0.38235;
```

```
Rind_leitura(2)=0.38235;
```

```
Rind_leitura(3)=0.38530;
```

```
DesvPad_Rind=std(Rind_leitura);
```

```
Rind_res=0.0001;
```

calib_Rind=2*Rind_res; % Incerteza da calibração do Raio do Indentador

```
k_Rind_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do Raio do Indentador
```

% Leituras do módulo de elasticidade E0

```
E0 leitura(1)=209878.8;
```

```
E0_leitura(2)=208656.7;
```

```
E0 leitura(3)=210452.7;
```

```
E0 leitura(4)=211255.1;
```

```
E0 leitura(5)=210965.0;
```

```
DesvPad_E0=std(E0_leitura);
```

```
E0  res=0.1;
```

calib E0=0.0013*mean(E0 leitura); % Incerteza da calibração do módulo de elasticidade

k E0 calib=2; %Fator de abrangência da calibração do módulo de elasticidade

[illegible]

%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 12

```
Ciclo br = Dados(6,:);
```

```
Ciclo = transpose(Ciclo br);
```

```
Forca br = Dados(3,:);
```

```
Forca = transpose(Forca br);
```

$$\text{MatForca} = [\text{Forca Ciclo}];$$
[illegible]

```
[MaxForca12,IForca12] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca12 = IForca12-7;
```

```
LimSupForca12 = IForca12+7;
```

```
Fmax(1:12)=0;
```

```
Fmax(12) = MaxForca12;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 12
```

```
VetForca12 = Forca(LimInfForca12:LimSupForca12);
```

```
DesvPad_VetForca12 = std(VetForca12);
```

```
DesvPad_Fmax(1:12)=0;
```

```
DesvPad_Fmax(12)=DesvPad_VetForca12;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 12
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 12;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 12
```

```
Ciclo_br = Dados(6,:);
```

```
Ciclo = transpose(Ciclo_br);
```

```
Prof_br = Dados(2,:);
```

```
Prof = transpose(Prof_br);
```

```
MatProf = [Prof Ciclo];
```

```
%%%%%%%%%
```

```
[MaxProf12,IProf12] = max(Prof);
```

```
LimInfProf12 = IProf12-7;
```

```
LimSupProf12 = IProf12+7;
```

```
Profmax(1:12)=0; %%%% Não repetir
```

```
Profmax(12) = MaxProf12;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 12
```

```
VetProf12 = Prof(LimInfProf12:LimSupProf12);
```

```
DesvPad_VetProf12 = std(VetProf12);
```

```
DesvPad_Profmax(1:12)=0;
```

```
DesvPad_Profmax(12)=DesvPad_VetProf12;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 12
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 12;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 12 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si12 = IProf12+200;
```

```
VetSiProf12 = Prof(IProf12:Lim_Si12);
```

```
VetSiForca12 = Forca(IProf12:Lim_Si12);
```

```
regressao_12 = polyfit(VetSiProf12,VetSiForca12,1);
```

```
Si_12 = regressao_12(1);
```

```
CoefLin_12 = regressao_12(2);
```

```
hpi_12 = -1*CoefLin_12/Si_12;
```

```
Si(1:12)=0;
```

```
Si(12)=Si_12;
```

```
hpi(1:12)=0;
```

```
hpi(12)=hpi_12;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 12
```

```
aeffi_12_01=(hpi(12)^2+(2*Profmax(12)*Rind-Profmax(12)^2))/(2*hpi(12));
```

```
aeffi_01(1:12)=0;
```

```
aeffi_01(12)=aeffi_12_01;
```

```
aeffi_12_02=((Profmax(12)-hpi(12))*Rind*aeffi_01(12))/(aeffi_01(12)-Rind);
```

```
aeffi_02(1:12)=0;
```

```
aeffi_02(12)=aeffi_12_02;
```

```
aeffi_12_FINAL=sqrt(aeffi_02(12));
```

```
aeffi_FINAL(1:12)=0;
```

```
aeffi_FINAL(12)=aeffi_12_FINAL;
```

```
% Cálculo de Eeffi do ciclo 12
```

```
Eeffi_12=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(12)/Si(12)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(1:12)=0;
```

```
Eeffi(12)=Eeffi_12;
```

% Cálculo de Di do ciclo 12

$Di_12 = 1 - (E_{effi}(12)/E_0);$

$Di(1:12) = 0;$ %Não repetir

$Di(12) = Di_12;$

% Cálculo de S0i do ciclo 12

$S0i_12 = (2 * a_{effi_FINAL}(12)) / ((1 - v^2)/E_0 + (1 - v_{ind}^2)/E_{ind});$

$S0i(1:12) = 0;$ % Não repetir

$S0i(12) = S0i_12;$

% Cálculo de Aeqi do ciclo 12

$Aeqi_12 = 3.14159265359 * (a_{effi_FINAL}(12)^2) * Di(12);$

$Aeqi(1:12) = 0;$ % Não repetir

$Aeqi(12) = Aeqi_12;$

% Cálculo de Udi do ciclo 12

$Udi_12 = 0.5 * F_{max}(12) * (Prof_{max}(12) - h_{pi}(12) - (F_{max}(12)/S0i(12)));$

$Udi(1:12) = 0;$

$Udi(12) = Udi_12;$

%%
 %%%

%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 11

$[MaxForca11, IForca11] = \max(MatForca(1:size(MatForca)));$

$LimInfForca11 = IForca11 - 7;$

```
LimSupForca11 = IForca11+7;
```

```
Fmax(11) = MaxForca11;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 11
```

```
VetForca11 = Forca(LimInfForca11:LimSupForca11);
```

```
DesvPad_VetForca11 = std(VetForca11);
```

```
DesvPad_Fmax(11)=DesvPad_VetForca11;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 11
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 11;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 11
```

```
[MaxProf11,IProf11] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf11 = IProf11-7;
```

```
LimSupProf11 = IProf11+7;
```

```
Profmax(11) = MaxProf11;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrão do ciclo 11
```

```
VetProf11 = Prof(LimInfProf11:LimSupProf11);
```

```
DesvPad_VetProf11 = std(VetProf11);
```

```
DesvPad_Profmax(11)=DesvPad_VetProf11;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 11
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 11;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
% Cálculo de Si e hpi do ciclo 11 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si11 = IProf11+200;
```

```
VetSiProf11 = Prof(IProf11:Lim_Si11);
```

```
VetSiForca11 = Forca(IProf11:Lim_Si11);
```

```
regressao_11 = polyfit(VetSiProf11,VetSiForca11,1);
```

```
Si_11 = regressao_11(1);
```

```
CoefLin_11 = regressao_11(2);
```

```
hpi_11 = -1*CoefLin_11/Si_11;
```

```
Si(11)=Si_11;
```

```
hpi(11)=hpi_11;
```

```
% Cálculo de aeffi do ciclo 11
```

```
aeffi_11_01=(hpi(11)^2+(2*Profmax(11)*Rind-Profmax(11)^2))/(2*hpi(11));
```

```
aeffi_01(11)=aeffi_11_01;
```

```
aeffi_11_02=((Profmax(11)-hpi(11))*Rind*aeffi_01(11))/(aeffi_01(11)-Rind);
```

```
aeffi_02(11)=aeffi_11_02;
```



```
aeffi_11_FINAL=sqrt(aeffi_02(11));
aeffi_FINAL(11)=aeffi_11_FINAL;
```

```
% Cálculo de Eeffi do ciclo 11
```

```
Eeffi_11=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(11)/Si(11)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(11)=Eeffi_11;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 11
```

```
Di_11=1-(Eeffi(11)/E0);
Di(11)=Di_11;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 11
```

```
S0i_11=(2*aeffi_FINAL(11))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(11)=S0i_11;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 11
```

```
Aeqi_11=3.14159265359*(aeffi_FINAL(11)^2)*Di(11);
Aeqi(11)=Aeqi_11;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 11
```

```
Udi_11=0.5*Fmax(11)*(Profmax(11)-hpi(11)-(Fmax(11)/S0i(11)));
Udi(11)=Udi_11;
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca10,IForca10] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca10 = IForca10-7;
```

```
LimSupForca10 = IForca10+7;
```

```
Fmax(10) = MaxForca10;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 10
```

```
VetForca10 = Forca(LimInfForca10:LimSupForca10);
```

```
DesvPad_VetForca10 = std(VetForca10);
```

```
DesvPad_Fmax(10)=DesvPad_VetForca10;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 10
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 10;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
% Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 10
```

```
[MaxProf10,IProf10] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf10 = IProf10-7;
```

```
LimSupProf10 = IProf10+7;
```

```
Profmax(10) = MaxProf10;
```

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 10

VetProf10 = Prof(LimInfProf10:LimSupProf10);

DesvPad_VetProf10 = std(VetProf10);

DesvPad_Profmax(10)=DesvPad_VetProf10;

%%% Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 10

MatProf1=size(MatProf);

MatProf2=MatProf1(1);

for i = 1:MatProf2

 if MatProf(i,2) == 10;

 MatProf(i,1) = 0;

 end

end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 10 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si10 = IProf10+200;

VetSiProf10 = Prof(IProf10:Lim_Si10);

VetSiForca10 = Forca(IProf10:Lim_Si10);

regressao_10 = polyfit(VetSiProf10,VetSiForca10,1);

Si_10 = regressao_10(1);

CoefLin_10 = regressao_10(2);

hpi_10 = -1*CoefLin_10/Si_10;

Si(10)=Si_10;

hpi(10)=hpi_10;

%Cálculo de aeffi do ciclo 10

```
aeffi_10_01=(hpi(10)^2+(2*Profmax(10)*Rind-Profmax(10)^2)/(2*hpi(10));
aeffi_01(10)=aeffi_10_01;
```

```
aeffi_10_02=((Profmax(10)-hpi(10))*Rind*aeffi_01(10))/(aeffi_01(10)-Rind);
aeffi_02(10)=aeffi_10_02;
```

```
aeffi_10_FINAL=sqrt(aeffi_02(10));
aeffi_FINAL(10)=aeffi_10_FINAL;
```

%Cálculo de Eeffi do ciclo 10

```
Eeffi_10=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(10)/Si(10)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(10)=Eeffi_10;
```

%Cálculo de Di do ciclo 10

```
Di_10=1-(Eeffi(10)/E0);
Di(10)=Di_10;
```

% Cálculo de S0i do ciclo 10

```
S0i_10=(2*aeffi_FINAL(10))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(10)=S0i_10;
```

% Cálculo de Aeqi do ciclo 10

```
Aeqi_10=3.14159265359*(aeffi_FINAL(10)^2)*Di(10);
Aeqi(10)=Aeqi_10;
```

% Cálculo de Udi do ciclo 10

Udi_10=0.5*Fmax(10)*(Profmax(10)-hpi(10)-(Fmax(10)/S0i(10)));

Udi(10)=Udi_10;

%%
 %%%

%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 09

[MaxForca09,IForca09] = max(MatForca(1:size(MatForca)));

LimInfForca09 = IForca09-7;

LimSupForca09 = IForca09+7;

Fmax(09) = MaxForca09;

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 09

VetForca09 = Forca(LimInfForca09:LimSupForca09);

DesvPad_VetForca09 = std(VetForca09);

DesvPad_Fmax(09)=DesvPad_VetForca09;

%%% Rotina para zerar os valores de força do ciclo 09

MatForca1=size(MatForca);

MatForca2=MatForca1(1);

for i = 1:MatForca2

if MatForca(i,2) == 9;

MatForca(i,1) = 0;

end

end

%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 09

```
[MaxProf09,IProf09] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf09 = IProf09-7;
```

```
LimSupProf09 = IProf09+7;
```

```
Profmax(09) = MaxProf09;
```

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 09

```
VetProf09 = Prof(LimInfProf09:LimSupProf09);
```

```
DesvPad_VetProf09 = std(VetProf09);
```

```
DesvPad_Profmax(09)=DesvPad_VetProf09;
```

%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 09

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 9;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 09 (coeficiente angular da reta)

```
Lim_Si09 = IProf09+200;
```

```
VetSiProf09 = Prof(IProf09:Lim_Si09);
```

```
VetSiForca09 = Forca(IProf09:Lim_Si09);
```

```
regressao_09 = polyfit(VetSiProf09,VetSiForca09,1);
```

```
Si_09 = regressao_09(1);
```

```
CoefLin_09 = regressao_09(2);
```

```
hpi_09 = -1*CoefLin_09/Si_09;
```

```
Si(09)=Si_09;
```

```
hpi(09)=hpi_09;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 09
```

```
aeffi_09_01=(hpi(09)^2+(2*Profmax(09)*Rind-Profmax(09)^2))/(2*hpi(09));
```

```
aeffi_01(09)=aeffi_09_01;
```

```
aeffi_09_02=((Profmax(09)-hpi(09))*Rind*aeffi_01(09))/(aeffi_01(09)-Rind);
```

```
aeffi_02(09)=aeffi_09_02;
```

```
aeffi_09_FINAL=sqrt(aeffi_02(09));
```

```
aeffi_FINAL(09)=aeffi_09_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 09
```

```
Eeffi_09=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(09)/Si(09)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(09)=Eeffi_09;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 09
```

```
Di_09=1-(Eeffi(09)/E0);
```

```
Di(09)=Di_09;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 09
```

```
S0i_09=(2*aeffi_FINAL(09))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
```

```
S0i(09)=S0i_09;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 09
```

```
Aeqi_09=3.14159265359*(aeffi_FINAL(09)^2)*Di(09);
```

```
Aeqi(09)=Aeqi_09;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 09
```

```
Udi_09=0.5*Fmax(09)*(Profmax(09)-hpi(09)-(Fmax(09)/S0i(09)));
```

```
Udi(09)=Udi_09;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 08
```

```
[MaxForca08,IForca08] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca08 = IForca08-7;
```

```
LimSupForca08 = IForca08+7;
```

```
Fmax(08) = MaxForca08;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 08
```

```
VetForca08 = Forca(LimInfForca08:LimSupForca08);
```

```
DesvPad_VetForca08 = std(VetForca08);
```

```
%DesvPad_Fmax(1:12)=0; %%%%% Não repetir
```

```
DesvPad_Fmax(08)=DesvPad_VetForca08;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 08
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```



```

for i = 1:MatForca2
    if MatForca(i,2) == 8;
        MatForca(i,1) = 0;
    end
end

```

%Rotina de aquisicao do valor maximo de profundidade do ciclo

```

[MaxProf08,IProf08] = max(MatProf(1:size(MatProf)));

```

```

LimInfProf08 = IProf08-7;
LimSupProf08 = IProf08+7;

```

```

Profmax(08) = MaxProf08;

```

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 08

```

VetProf08 = Prof(LimInfProf08:LimSupProf08);

```

```

DesvPad_VetProf08 = std(VetProf08);
DesvPad_Profmax(08)=DesvPad_VetProf08;

```

%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 08

```

MatProf1=size(MatProf);
MatProf2=MatProf1(1);
for i = 1:MatProf2
    if MatProf(i,2) == 8;
        MatProf(i,1) = 0;
    end
end

```

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 08 (coeficiente angular da reta)

```

Lim_Si08 = IProf08+200;

```

```

VetSiProf08 = Prof(IProf08:Lim_Si08);
VetSiForca08 = Forca(IProf08:Lim_Si08);

regressao_08 = polyfit(VetSiProf08,VetSiForca08,1);

Si_08 = regressao_08(1);
CoefLin_08 = regressao_08(2);

hpi_08 = -1*CoefLin_08/Si_08;

Si(08)=Si_08;

hpi(08)=hpi_08;

%Cálculo de aeffi do ciclo 08

aeffi_08_01=(hpi(08)^2+(2*Profmax(08)*Rind-Profmax(08)^2))/(2*hpi(08));
aeffi_01(08)=aeffi_08_01;

aeffi_08_02=((Profmax(08)-hpi(08))*Rind*aeffi_01(08))/(aeffi_01(08)-Rind);
aeffi_02(08)=aeffi_08_02;

aeffi_08_FINAL=sqrt(aeffi_02(08));
aeffi_FINAL(08)=aeffi_08_FINAL;

%Cálculo de Eeffi do ciclo 08

Eeffi_08=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(08)/Si(08)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(08)=Eeffi_08;

```

%Cálculo de Di do ciclo 08

$Di_08 = 1 - (E_{effi}(08)/E_0);$

$Di(08) = Di_08;$

% Cálculo de S0i do ciclo 08

$S0i_08 = (2 * a_{effi_FINAL}(08)) / ((1 - v^2)/E_0 + (1 - v_{ind}^2)/E_{ind});$

$S0i(08) = S0i_08;$

% Cálculo de Aeqi do ciclo 08

$Aeqi_08 = 3.14159265359 * (a_{effi_FINAL}(08)^2) * Di(08);$

$Aeqi(08) = Aeqi_08;$

% Cálculo de Udi do ciclo 08

$Udi_08 = 0.5 * F_{max}(08) * (Prof_{max}(08) - h_{pi}(08) - (F_{max}(08)/S0i(08)));$

$Udi(08) = Udi_08;$

%%%

%%%

%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 07

$[MaxForca07, IForca07] = \max(MatForca(1:size(MatForca)));$

$LimInfForca07 = IForca07 - 7;$

$LimSupForca07 = IForca07 + 7;$

$F_{max}(07) = MaxForca07;$

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 07

```
VetForca07 = Forca(LimInfForca07:LimSupForca07);
```

```
DesvPad_VetForca07 = std(VetForca07);
```

```
DesvPad_Fmax(07)=DesvPad_VetForca07;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 07
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 7;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 07
```

```
[MaxProf07,IProf07] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf07 = IProf07-7;
```

```
LimSupProf07 = IProf07+7;
```

```
Profmax(07) = MaxProf07;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 07
```

```
VetProf07 = Prof(LimInfProf07:LimSupProf07);
```

```
DesvPad_VetProf07 = std(VetProf07);
```

```
DesvPad_Profmax(07)=DesvPad_VetProf07;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 07
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```

    if MatProf(i,2) == 7;
        MatProf(i,1) = 0;
    end
end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 07 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si07 = IProf07+200;
VetSiProf07 = Prof(IProf07:Lim_Si07);
VetSiForca07 = Forca(IProf07:Lim_Si07);

regressao_07 = polyfit(VetSiProf07,VetSiForca07,1);

Si_07 = regressao_07(1);
CoefLin_07 = regressao_07(2);

hpi_07 = -1*CoefLin_07/Si_07;

Si(07)=Si_07;

hpi(07)=hpi_07;

%Cálculo de aeffi do ciclo 07

aeffi_07_01=(hpi(07)^2+(2*Profmax(07)*Rind-Profmax(07)^2)/(2*hpi(07)));
aeffi_01(07)=aeffi_07_01;

aeffi_07_02=((Profmax(07)-hpi(07))*Rind*aeffi_01(07))/(aeffi_01(07)-Rind);
aeffi_02(07)=aeffi_07_02;

aeffi_07_FINAL=sqrt(aeffi_02(07));
aeffi_FINAL(07)=aeffi_07_FINAL;

```

%Cálculo de Eeffi do ciclo 07

$E_{effi_07} = (1 - v^2) / ((2 * a_{effi_FINAL}(07) / S_i(07) - ((1 - v_{ind}^2) / E_{ind})))$;
 $E_{effi}(07) = E_{effi_07}$;

%Cálculo de Di do ciclo 07

$D_{i_07} = 1 - (E_{effi}(07) / E_0)$;
 $D_i(07) = D_{i_07}$;

% Cálculo de S0i do ciclo 07

$S_{0i_07} = (2 * a_{effi_FINAL}(07)) / ((1 - v^2) / E_0 + (1 - v_{ind}^2) / E_{ind})$;
 $S_{0i}(07) = S_{0i_07}$;

% Cálculo de Aeqi do ciclo 07

$A_{eqi_07} = 3.14159265359 * (a_{effi_FINAL}(07)^2) * D_i(07)$;
 $A_{eqi}(07) = A_{eqi_07}$;

% Cálculo de Udi do ciclo 07

$U_{di_07} = 0.5 * F_{max}(07) * (Prof_{max}(07) - h_{pi}(07) - (F_{max}(07) / S_{0i}(07)))$;
 $U_{di}(07) = U_{di_07}$;

%%
 %%%

%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 06

```
[MaxForca06,IForca06] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca06 = IForca06-7;
```

```
LimSupForca06 = IForca06+7;
```

```
Fmax(06) = MaxForca06;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 06
```

```
VetForca06 = Forca(LimInfForca06:LimSupForca06);
```

```
DesvPad_VetForca06 = std(VetForca06);
```

```
DesvPad_Fmax(06)=DesvPad_VetForca06;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 06
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 6;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 06
```

```
[MaxProf06,IProf06] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf06 = IProf06-7;
```

```
LimSupProf06 = IProf06+7;
```

```
Profmax(06) = MaxProf06;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 06
```

```
VetProf06 = Prof(LimInfProf06:LimSupProf06);
```

```
DesvPad_VetProf06 = std(VetProf06);
```

```
DesvPad_Profmax(06)=DesvPad_VetProf06;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 06
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 6;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 06 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si06 = IProf06+200;
```

```
VetSiProf06 = Prof(IProf06:Lim_Si06);
```

```
VetSiForca06 = Forca(IProf06:Lim_Si06);
```

```
regressao_06 = polyfit(VetSiProf06,VetSiForca06,1);
```

```
Si_06 = regressao_06(1);
```

```
CoefLin_06 = regressao_06(2);
```

```
hpi_06 = -1*CoefLin_06/Si_06;
```

```
Si(06)=Si_06;
```

```
hpi(06)=hpi_06;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 06
```



```
aeffi_06_01=(hpi(06)^2+(2*Profmax(06)*Rind-Profmax(06)^2)/(2*hpi(06)));
aeffi_01(06)=aeffi_06_01;
```

```
aeffi_06_02=((Profmax(06)-hpi(06))*Rind*aeffi_01(06))/(aeffi_01(06)-Rind);
aeffi_02(06)=aeffi_06_02;
```

```
aeffi_06_FINAL=sqrt(aeffi_02(06));
aeffi_FINAL(06)=aeffi_06_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 06
```

```
Eeffi_06=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(06)/Si(06)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(06)=Eeffi_06;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 06
```

```
Di_06=1-(Eeffi(06)/E0);
Di(06)=Di_06;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 06
```

```
S0i_06=(2*aeffi_FINAL(06))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(06)=S0i_06;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 06
```

```
Aeqi_06=3.14159265359*(aeffi_FINAL(06)^2)*Di(06);
Aeqi(06)=Aeqi_06;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 06
```

```
Udi_06=0.5*Fmax(06)*(Profmax(06)-hpi(06)-(Fmax(06)/S0i(06)));
```

```
Udi(06)=Udi_06;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 05
```

```
[MaxForca05,IForca05] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca05 = IForca05-7;
```

```
LimSupForca05 = IForca05+7;
```

```
Fmax(05) = MaxForca05;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 05
```

```
VetForca05 = Forca(LimInfForca05:LimSupForca05);
```

```
DesvPad_VetForca05 = std(VetForca05);
```

```
DesvPad_Fmax(05)=DesvPad_VetForca05;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 05
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 5;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 05
```

```
[MaxProf05,IProf05] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf05 = IProf05-7;
```

```
LimSupProf05 = IProf05+7;
```

```
Profmax(05) = MaxProf05;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 05
```

```
VetProf05 = Prof(LimInfProf05:LimSupProf05);
```

```
DesvPad_VetProf05 = std(VetProf05);
```

```
DesvPad_Profmax(05)=DesvPad_VetProf05;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 05
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 5;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 05 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si05 = IProf05+200;

VetSiProf05 = Prof(IProf05:Lim_Si05);

VetSiForca05 = Forca(IProf05:Lim_Si05);

regressao_05 = polyfit(VetSiProf05,VetSiForca05,1);

Si_05 = regressao_05(1);

CoefLin_05 = regressao_05(2);

hpi_05 = -1*CoefLin_05/Si_05;

Si(05)=Si_05;

hpi(05)=hpi_05;

%Cálculo de aeffi do ciclo 05

aeffi_05_01=(hpi(05)^2+(2*Profmax(05)*Rind-Profmax(05)^2))/(2*hpi(05));

aeffi_01(05)=aeffi_05_01;

aeffi_05_02=((Profmax(05)-hpi(05))*Rind*aeffi_01(05))/(aeffi_01(05)-Rind);

aeffi_02(05)=aeffi_05_02;

aeffi_05_FINAL=sqrt(aeffi_02(05));

aeffi_FINAL(05)=aeffi_05_FINAL;

%Cálculo de Eeffi do ciclo 05

```

Eeffi_05=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(05)/Si(05)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(05)=Eeffi_05;

```

```

%Cálculo de Di do ciclo 05

```

```

Di_05=1-(Eeffi(05)/E0);
Di(05)=Di_05;

```

```

% Cálculo de S0i do ciclo 05

```

```

S0i_05=(2*aeffi_FINAL(05))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(05)=S0i_05;

```

```

% Cálculo de Aeqi do ciclo 05

```

```

Aeqi_05=3.14159265359*(aeffi_FINAL(05)^2)*Di(05);
Aeqi(05)=Aeqi_05;

```

```

% Cálculo de Udi do ciclo 05

```

```

Udi_05=0.5*Fmax(05)*(Profmax(05)-hpi(05)-(Fmax(05)/S0i(05)));
Udi(05)=Udi_05;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 04

```

```

[MaxForca04,IForca04] = max(MatForca(1:size(MatForca)));

```

```

LimInfForca04 = IForca04-7;

```

```
LimSupForca04 = IForca04+7;
```

```
Fmax(04) = MaxForca04;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 04
```

```
VetForca04 = Forca(LimInfForca04:LimSupForca04);
```

```
DesvPad_VetForca04 = std(VetForca04);
```

```
DesvPad_Fmax(04)=DesvPad_VetForca04;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 04
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 4;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisicao do valor maximo de profundidade do ciclo 04
```

```
[MaxProf04,IProf04] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf04 = IProf04-7;
```

```
LimSupProf04 = IProf04+7;
```

```
Profmax(04) = MaxProf04;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 04
```

```
VetProf04 = Prof(LimInfProf04:LimSupProf04);
```

```
DesvPad_VetProf04 = std(VetProf04);
```

```
DesvPad_Profmax(04)=DesvPad_VetProf04;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 04
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 4;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 04 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si04 = IProf04+200;
```

```
VetSiProf04 = Prof(IProf04:Lim_Si04);
```

```
VetSiForca04 = Forca(IProf04:Lim_Si04);
```

```
regressao_04 = polyfit(VetSiProf04,VetSiForca04,1);
```

```
Si_04 = regressao_04(1);
```

```
CoefLin_04 = regressao_04(2);
```

```
hpi_04 = -1*CoefLin_04/Si_04;
```

```
Si(04)=Si_04;
```

```
hpi(04)=hpi_04;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 04
```

```
aeffi_04_01=(hpi(04)^2+(2*Profmax(04)*Rind-Profmax(04)^2))/(2*hpi(04));
```

```
aeffi_01(04)=aeffi_04_01;
```

```
aeffi_04_02=((Profmax(04)-hpi(04))*Rind*aeffi_01(04))/(aeffi_01(04)-Rind);
aeffi_02(04)=aeffi_04_02;
```

```
aeffi_04_FINAL=sqrt(aeffi_02(04));
aeffi_FINAL(04)=aeffi_04_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 04
```

```
Eeffi_04=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(04)/Si(04)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(04)=Eeffi_04;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 04
```

```
Di_04=1-(Eeffi(04)/E0);
Di(04)=Di_04;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 04
```

```
S0i_04=(2*aeffi_FINAL(04))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(04)=S0i_04;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 04
```

```
Aeqi_04=3.14159265359*(aeffi_FINAL(04)^2)*Di(04);
Aeqi(04)=Aeqi_04;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 04
```

```
Udi_04=0.5*Fmax(04)*(Profmax(04)-hpi(04)-(Fmax(04)/S0i(04)));
Udi(04)=Udi_04;
```



```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 03
```

```
[MaxForca03,IForca03] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca03 = IForca03-7;
```

```
LimSupForca03 = IForca03+7;
```

```
Fmax(03) = MaxForca03;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 03
```

```
VetForca03 = Forca(LimInfForca03:LimSupForca03);
```

```
DesvPad_VetForca03 = std(VetForca03);
```

```
DesvPad_Fmax(03)=DesvPad_VetForca03;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 03
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 3;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisicao do valor maximo de profundidade do ciclo 03
```

```
[MaxProf03,IProf03] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```
LimInfProf03 = IProf03-7;
```

```
LimSupProf03 = IProf03+7;
```

```
Profmax(03) = MaxProf03;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 03
```

```
VetProf03 = Prof(LimInfProf03:LimSupProf03);
```

```
DesvPad_VetProf03 = std(VetProf03);
```

```
DesvPad_Profmax(03)=DesvPad_VetProf03;
```

```
%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 03
```

```
MatProf1=size(MatProf);
```

```
MatProf2=MatProf1(1);
```

```
for i = 1:MatProf2
```

```
    if MatProf(i,2) == 3;
```

```
        MatProf(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Cálculo de Si e hpi do ciclo 03 (coeficiente angular da reta)
```

```
Lim_Si03 = IProf03+200;
```

```
VetSiProf03 = Prof(IProf03:Lim_Si03);
```

```
VetSiForca03 = Forca(IProf03:Lim_Si03);
```

```
regressao_03 = polyfit(VetSiProf03,VetSiForca03,1);
```

```
Si_03 = regressao_03(1);
```

```
CoefLin_03 = regressao_03(2);
```

```
hpi_03 = -1*CoefLin_03/Si_03;
```

$Si(03)=Si_03;$

$hpi(03)=hpi_03;$

%Cálculo de a_{effi} do ciclo 03

$a_{effi_03_01}=(hpi(03)^2+(2*Profmax(03)*Rind-Profmax(03)^2)/(2*hpi(03)));$

$a_{effi_01}(03)=a_{effi_03_01};$

$a_{effi_03_02}=((Profmax(03)-hpi(03))*Rind*a_{effi_01}(03))/(a_{effi_01}(03)-Rind);$

$a_{effi_02}(03)=a_{effi_03_02};$

$a_{effi_03_FINAL}=\sqrt{a_{effi_02}(03)};$

$a_{effi_FINAL}(03)=a_{effi_03_FINAL};$

%Cálculo de E_{effi} do ciclo 03

$E_{effi_03}=(1-v^2)/((2*a_{effi_FINAL}(03)/Si(03)-((1-vind^2)/Eind)));$

$E_{effi}(03)=E_{effi_03};$

%Cálculo de Di do ciclo 03

$Di_03=1-(E_{effi}(03)/E0);$

$Di(03)=Di_03;$

% Cálculo de $S0i$ do ciclo 03

$S0i_03=(2*a_{effi_FINAL}(03))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);$

$S0i(03)=S0i_03;$

% Cálculo de Aeqi do ciclo 03

```
Aeqi_03=3.14159265359*(aeffi_FINAL(03)^2)*Di(03);
Aeqi(03)=Aeqi_03;
```

% Cálculo de Udi do ciclo 03

```
Udi_03=0.5*Fmax(03)*(Profmax(03)-hpi(03)-(Fmax(03)/S0i(03)));
Udi(03)=Udi_03;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

%Rotina de aquisicao do valor maximo de forca do ciclo 02

```
[MaxForca02,IForca02] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca02 = IForca02-7;
```

```
LimSupForca02 = IForca02+7;
```

```
Fmax(02) = MaxForca02;
```

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 02

```
VetForca02 = Forca(LimInfForca02:LimSupForca02);
```

```
DesvPad_VetForca02 = std(VetForca02);
```

```
DesvPad_Fmax(02)=DesvPad_VetForca02;
```

%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 02

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```

    if MatForca(i,2) == 2;
        MatForca(i,1) = 0;
    end
end

```

%Rotina de aquisicao do valor maximo de profundidade do ciclo 02

```
[MaxProf02,IProf02] = max(MatProf(1:size(MatProf)));
```

```

LimInfProf02 = IProf02-7;
LimSupProf02 = IProf02+7;

```

```
Profmax(02) = MaxProf02;
```

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 02

```
VetProf02 = Prof(LimInfProf02:LimSupProf02);
```

```

DesvPad_VetProf02 = std(VetProf02);
DesvPad_Profmax(02)=DesvPad_VetProf02;

```

%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 02

```

MatProf1=size(MatProf);
MatProf2=MatProf1(1);
for i = 1:MatProf2
    if MatProf(i,2) == 2;
        MatProf(i,1) = 0;
    end
end

```

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 02 (coeficiente angular da reta)

```

Lim_Si02 = IProf02+200;
VetSiProf02 = Prof(IProf02:Lim_Si02);

```

```
VetSiForca02 = Forca(IProf02:Lim_Si02);
```

```
regressao_02 = polyfit(VetSiProf02,VetSiForca02,1);
```

```
Si_02 = regressao_02(1);
```

```
CoefLin_02 = regressao_02(2);
```

```
hpi_02 = -1*CoefLin_02/Si_02;
```

```
Si(02)=Si_02;
```

```
hpi(02)=hpi_02;
```

```
%Cálculo de aeffi do ciclo 02
```

```
aeffi_02_01=(hpi(02)^2+(2*Profmax(02)*Rind-Profmax(02)^2)/(2*hpi(02)));
```

```
aeffi_01(02)=aeffi_02_01;
```

```
aeffi_02_02=((Profmax(02)-hpi(02))*Rind*aeffi_01(02))/(aeffi_01(02)-Rind);
```

```
aeffi_02(02)=aeffi_02_02;
```

```
aeffi_02_FINAL=sqrt(aeffi_02(02));
```

```
aeffi_FINAL(02)=aeffi_02_FINAL;
```

```
%Cálculo de Eeffi do ciclo 02
```

```
Eeffi_02=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(02)/Si(02)-((1-vind^2)/Eind)));
```

```
Eeffi(02)=Eeffi_02;
```

```
%Cálculo de Di do ciclo 02
```

```
Di_02=1-(Eeffi(02)/E0);
```

```
Di(02)=Di_02;
```

```
% Cálculo de S0i do ciclo 02
```

```
S0i_02=(2*aeffi_FINAL(02))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
```

```
S0i(02)=S0i_02;
```

```
% Cálculo de Aeqi do ciclo 02
```

```
Aeqi_02=3.14159265359*(aeffi_FINAL(02)^2)*Di(02);
```

```
Aeqi(02)=Aeqi_02;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 02
```

```
Udi_02=0.5*Fmax(02)*(Profmax(02)-hpi(02)-(Fmax(02)/S0i(02)));
```

```
Udi(02)=Udi_02;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de força do ciclo 01
```

```
[MaxForca01,IForca01] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca01 = IForca01-7;
```

```
LimSupForca01 = IForca01+7;
```

```
Fmax(01) = MaxForca01;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrao do ciclo 01
```

```
VetForca01 = Forca(LimInfForca01:LimSupForca01);
```

```

DesvPad_VetForca01 = std(VetForca01);
DesvPad_Fmax(01)=DesvPad_VetForca01;

%%%Rotina para zerar os valores de força do ciclo 01
MatForca1=size(MatForca);
MatForca2=MatForca1(1);
for i = 1:MatForca2
    if MatForca(i,2) == 1;
        MatForca(i,1) = 0;
    end
end

%Rotina de aquisicao do valor maximo de profundidade do ciclo 01

[MaxProf01,IProf01] = max(MatProf(1:size(MatProf)));

LimInfProf01 = IProf01-7;
LimSupProf01 = IProf01+7;

Profmax(01) = MaxProf01;

%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 01
VetProf01 = Prof(LimInfProf01:LimSupProf01);

DesvPad_VetProf01 = std(VetProf01);
DesvPad_Profmax(01)=DesvPad_VetProf01;

%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 01
MatProf1=size(MatProf);
MatProf2=MatProf1(1);
for i = 1:MatProf2
    if MatProf(i,2) == 1;

```



```

        MatProf(i,1) = 0;
    end
end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 01 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si01 = IProf01+200;
VetSiProf01 = Prof(IProf01:Lim_Si01);
VetSiForca01 = Forca(IProf01:Lim_Si01);

regressao_01 = polyfit(VetSiProf01,VetSiForca01,1);

Si_01 = regressao_01(1);
CoefLin_01 = regressao_01(2);

hpi_01 = -1*CoefLin_01/Si_01;

Si(01)=Si_01;

hpi(01)=hpi_01;

%Cálculo de aeffi do ciclo 01

aeffi_01_01=(hpi(01)^2+(2*Profmax(01)*Rind-Profmax(01)^2)/(2*hpi(01)));
aeffi_01(01)=aeffi_01_01;

aeffi_01_02=((Profmax(01)-hpi(01))*Rind*aeffi_01(01))/(aeffi_01(01)-Rind);
aeffi_02(01)=aeffi_01_02;

aeffi_01_FINAL=sqrt(aeffi_02(01));
aeffi_FINAL(01)=aeffi_01_FINAL;

```

%Cálculo de Eeffi do ciclo 01

$$E_{effi_01} = (1 - v^2) / ((2 * a_{effi_FINAL}(01) / S_i(01) - ((1 - v_{ind}^2) / E_{ind})));$$

$$E_{effi}(01) = E_{effi_01};$$

%Cálculo de Di do ciclo 01

$$D_{i_01} = 1 - (E_{effi}(01) / E_0);$$

$$D_i(01) = D_{i_01};$$

% Cálculo de S0i do ciclo 01

$$S_{0i_01} = (2 * a_{effi_FINAL}(01)) / ((1 - v^2) / E_0 + (1 - v_{ind}^2) / E_{ind});$$

$$S_{0i}(01) = S_{0i_01};$$

% Cálculo de Aeqi do ciclo 01

$$A_{eqi_01} = 3.14159265359 * (a_{effi_FINAL}(01)^2) * D_i(01);$$

$$A_{eqi}(01) = A_{eqi_01};$$

% Cálculo de Udi do ciclo 01

$$U_{di_01} = 0.5 * F_{max}(01) * (Prof_{max}(01) - h_{pi}(01) - (F_{max}(01) / S_{0i}(01)));$$

$$U_{di}(01) = U_{di_01};$$

%%%

%%%

%Cálculo da taxa de liberação de energia Jsit, Kiic e Kic

```
regressao_Jsit = polyfit(Aeqi,Udi,1);
```

```
Jsit = regressao_Jsit(1)
```

```
%Cálculo de Kiic
```

```
Kiic=sqrt(E0/(1-(v^2))*Jsit/1000)
```

```
%Cálculo de Kic
```

```
alfa = 0.35;
```

```
Kic=Kiic/alfa
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%% Cálculo das Incertezas Padrão
```

```
% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 12)
```

```
u_Fmax_leituras(1:12)=0;
```

```
u_Fmax_leituras(12)=DesvPad_Fmax(12)/sqrt(15);
```

```
u_Fmax_res(1:12)=0;
```

```
u_Fmax_res(12)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Fmax_calib(1:12)=0;
```

```
u_Fmax_calib(12)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;
```

```
u_Fmax(12)=sqrt(u_Fmax_leituras(12)^2+u_Fmax_res(12)^2+u_Fmax_calib(12)^2);
```

%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 11)

$u_Fmax_leituras(11) = DesvPad_Fmax(11) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(11) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(11) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(11) = \sqrt{u_Fmax_leituras(11)^2 + u_Fmax_res(11)^2 + u_Fmax_calib(11)^2};$

%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 10)

$u_Fmax_leituras(10) = DesvPad_Fmax(10) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(10) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(10) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(10) = \sqrt{u_Fmax_leituras(10)^2 + u_Fmax_res(10)^2 + u_Fmax_calib(10)^2};$

%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 09)

$u_Fmax_leituras(09) = DesvPad_Fmax(09) / \sqrt{15};$

$$u_Fmax_res(09)=Res_Fmax/(2*\sqrt{3});$$

$$u_Fmax_calib(09)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;$$

$$u_Fmax(09)=\sqrt{u_Fmax_leituras(09)^2+u_Fmax_res(09)^2+u_Fmax_calib(09)^2};$$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 08)

$$u_Fmax_leituras(08)=DesvPad_Fmax(08)/\sqrt{15};$$

$$u_Fmax_res(08)=Res_Fmax/(2*\sqrt{3});$$

$$u_Fmax_calib(08)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;$$

$$u_Fmax(08)=\sqrt{u_Fmax_leituras(08)^2+u_Fmax_res(08)^2+u_Fmax_calib(08)^2};$$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 07)

$$u_Fmax_leituras(07)=DesvPad_Fmax(07)/\sqrt{15};$$

$$u_Fmax_res(07)=Res_Fmax/(2*\sqrt{3});$$

$$u_Fmax_calib(07)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;$$

$$u_Fmax(07)=\sqrt{u_Fmax_leituras(07)^2+u_Fmax_res(07)^2+u_Fmax_calib(07)^2};$$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 07)

$u_Fmax_leituras(07) = DesvPad_Fmax(07) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(07) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(07) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(07) = \sqrt{u_Fmax_leituras(07)^2 + u_Fmax_res(07)^2 + u_Fmax_calib(07)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 06)

$u_Fmax_leituras(06) = DesvPad_Fmax(06) / \sqrt{15};$

$u_Fmax_res(06) = Res_Fmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Fmax_calib(06) = calib_Fmax / k_Fmax_calib;$

$u_Fmax(06) = \sqrt{u_Fmax_leituras(06)^2 + u_Fmax_res(06)^2 + u_Fmax_calib(06)^2};$

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 05)

$u_Fmax_leituras(05) = DesvPad_Fmax(05) / \sqrt{15};$

```
u_Fmax_res(05)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Fmax_calib(05)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;
```

```
u_Fmax(05)=sqrt(u_Fmax_leituras(05)^2+u_Fmax_res(05)^2+u_Fmax_calib(05)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 04)
```

```
u_Fmax_leituras(04)=DesvPad_Fmax(04)/sqrt(15);
```

```
u_Fmax_res(04)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Fmax_calib(04)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;
```

```
u_Fmax(04)=sqrt(u_Fmax_leituras(04)^2+u_Fmax_res(04)^2+u_Fmax_calib(04)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 03)
```

```
u_Fmax_leituras(03)=DesvPad_Fmax(03)/sqrt(15);
```

```
u_Fmax_res(03)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Fmax_calib(03)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;
```

```
u_Fmax(03)=sqrt(u_Fmax_leituras(03)^2+u_Fmax_res(03)^2+u_Fmax_calib(03)^2);
```

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 02)

u_Fmax_leituras(02)=DesvPad_Fmax(02)/sqrt(15);

u_Fmax_res(02)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));

u_Fmax_calib(02)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;

u_Fmax(02)=sqrt(u_Fmax_leituras(02)^2+u_Fmax_res(02)^2+u_Fmax_calib(02)^2);

%%%

% Incerteza padrão de Fmax (Ciclo 01)

u_Fmax_leituras(01)=DesvPad_Fmax(01)/sqrt(15);

u_Fmax_res(01)=Res_Fmax/(2*sqrt(3));

u_Fmax_calib(01)=calib_Fmax/k_Fmax_calib;

u_Fmax(01)=sqrt(u_Fmax_leituras(01)^2+u_Fmax_res(01)^2+u_Fmax_calib(01)^2);

%%%

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 12)

u_Profmax_leituras(1:12)=0;


```
u_Profmax_leituras(12)=DesvPad_Profmax(12)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(1:12)=0;
```

```
u_Profmax_res(12)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(1:12)=0;
```

```
u_Profmax_calib(12)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(12)=sqrt(u_Profmax_leituras(12)^2+u_Profmax_res(12)^2+u_Profmax_calib(12)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 11)
```

```
u_Profmax_leituras(11)=DesvPad_Profmax(11)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(11)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(11)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(11)=sqrt(u_Profmax_leituras(11)^2+u_Profmax_res(11)^2+u_Profmax_calib(11)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 10)
```

```
u_Profmax_leituras(10)=DesvPad_Profmax(10)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(10)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(10)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(10)=sqrt(u_Profmax_leituras(10)^2+u_Profmax_res(10)^2+u_Profmax_calib(10)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 09)
```

```
u_Profmax_leituras(09)=DesvPad_Profmax(09)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(09)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(09)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(09)=sqrt(u_Profmax_leituras(09)^2+u_Profmax_res(09)^2+u_Profmax_calib(09)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 08)
```

```
u_Profmax_leituras(08)=DesvPad_Profmax(08)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(08)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(08)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(08)=sqrt(u_Profmax_leituras(08)^2+u_Profmax_res(08)^2+u_Profmax_calib(08)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 07)
```

```
u_Profmax_leituras(07)=DesvPad_Profmax(07)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(07)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(07)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(07)=sqrt(u_Profmax_leituras(07)^2+u_Profmax_res(07)^2+u_Profmax_calib(07)^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 06)
```

```
u_Profmax_leituras(06)=DesvPad_Profmax(06)/sqrt(15);
```

```
u_Profmax_res(06)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));
```

```
u_Profmax_calib(06)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;
```

```
u_Profmax(06)=sqrt(u_Profmax_leituras(06)^2+u_Profmax_res(06)^2+u_Profmax_calib(06)^2);
```

%%%

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 05)

u_Profmax_leituras(05)=DesvPad_Profmax(05)/sqrt(15);

u_Profmax_res(05)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));

u_Profmax_calib(05)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;

u_Profmax(05)=sqrt(u_Profmax_leituras(05)^2+u_Profmax_res(05)^2+u_Profmax_calib(05)^2);

%%%

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 04)

u_Profmax_leituras(04)=DesvPad_Profmax(04)/sqrt(15);

u_Profmax_res(04)=Res_Profmax/(2*sqrt(3));

u_Profmax_calib(04)=calib_Profmax/k_Profmax_calib;

u_Profmax(04)=sqrt(u_Profmax_leituras(04)^2+u_Profmax_res(04)^2+u_Profmax_calib(04)^2);

[illegible][illegible]

% Incerteza padrão de Profmax (Ciclo 01)

$u_Profmax_leituras(01) = DesvPad_Profmax(01) / \sqrt{15};$

$u_Profmax_res(01) = Res_Profmax / (2 * \sqrt{3});$

$u_Profmax_calib(01) = calib_Profmax / k_Profmax_calib;$

$u_Profmax(01) = \sqrt{u_Profmax_leituras(01)^2 + u_Profmax_res(01)^2 + u_Profmax_calib(01)^2};$

%%%

% Incerteza Padrão de hpi

$u_hpi(1:12) = 0;$

$u_hpi(12) = 0.0001 * hpi(12) / \sqrt{3};$

$u_hpi(11) = 0.0001 * hpi(11) / \sqrt{3};$

$u_hpi(10) = 0.0001 * hpi(10) / \sqrt{3};$

$u_hpi(09) = 0.0001 * hpi(09) / \sqrt{3};$

$u_hpi(08) = 0.0001 * hpi(08) / \sqrt{3};$

$u_hpi(07) = 0.0001 * hpi(07) / \sqrt{3};$

$u_hpi(06) = 0.0001 * hpi(06) / \sqrt{3};$

$u_hpi(05) = 0.0001 * hpi(05) / \sqrt{3};$

$u_hpi(04) = 0.0001 * hpi(04) / \sqrt{3};$

$u_hpi(03) = 0.0001 * hpi(03) / \sqrt{3};$

$u_hpi(02) = 0.0001 * hpi(02) / \sqrt{3};$

$u_hpi(01) = 0.0001 * hpi(01) / \sqrt{3};$

% Incerteza Padrão de Si

```

u_Si(1:12)=0;
u_Si(12)=0.0001*Si(12)/sqrt(3);
u_Si(11)=0.0001*Si(11)/sqrt(3);
u_Si(10)=0.0001*Si(10)/sqrt(3);
u_Si(09)=0.0001*Si(09)/sqrt(3);
u_Si(08)=0.0001*Si(08)/sqrt(3);
u_Si(07)=0.0001*Si(07)/sqrt(3);
u_Si(06)=0.0001*Si(06)/sqrt(3);
u_Si(05)=0.0001*Si(05)/sqrt(3);
u_Si(04)=0.0001*Si(04)/sqrt(3);
u_Si(03)=0.0001*Si(03)/sqrt(3);
u_Si(02)=0.0001*Si(02)/sqrt(3);
u_Si(01)=0.0001*Si(01)/sqrt(3);

```

% Incerteza padrão do raio do indentador Rind

```

u_Rind_leituras=DesvPad_Rind/sqrt(3);
u_Rind_res=Rind_res/(2*sqrt(3));
u_Rind_calib=calib_Rind/k_Rind_calib;
u_Rind=sqrt(u_Rind_leituras^2+u_Rind_res^2+u_Rind_calib^2);

```

% Incerteza padrão de vind

```

u_vind=0.1*vind/sqrt(3);

```

% Incerteza padrão de Eind

```

u_Eind=0.0013*Eind/sqrt(3);

```

% Incerteza padrão de v

```
u_v=0.1*v/sqrt(3);
```

```
% Incerteza padrão de E0
```

```
u_E0_leituras=DesvPad_E0/sqrt(5);
```

```
u_E0_res=E0_res/(2*sqrt(3));
```

```
u_E0_calib=calib_E0/k_Rind_calib;
```

```
u_E0=sqrt(u_E0_leituras^2+u_E0_res^2+u_E0_calib^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Aplicação do Método de Monte Carlo para Jsit - Udi
```

```
MC_Fmax_12=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(12),u_Fmax(12));
```

```
MC_Fmax_11=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(11),u_Fmax(11));
```

```
MC_Fmax_10=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(10),u_Fmax(10));
```

```
MC_Fmax_09=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(09),u_Fmax(09));
```

```
MC_Fmax_08=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(08),u_Fmax(08));
```

```
MC_Fmax_07=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(07),u_Fmax(07));
```

```
MC_Fmax_06=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(06),u_Fmax(06));
```

```
MC_Fmax_05=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(05),u_Fmax(05));
```

```
MC_Fmax_04=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(04),u_Fmax(04));
```

```
MC_Fmax_03=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(03),u_Fmax(03));
```

```
MC_Fmax_02=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(02),u_Fmax(02));
```

```
MC_Fmax_01=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(01),u_Fmax(01));
```

```
MC_Profmax_12=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(12),u_Profmax(12));
```

```
MC_Profmax_11=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(11),u_Profmax(11));
```

```
MC_Profmax_10=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(10),u_Profmax(10));
```

```
MC_Profmax_09=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(09),u_Profmax(09));
```

```
MC_Profmax_08=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(08),u_Profmax(08));
```



```

MC_Profmax_07=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(07),u_Profmax(07));
MC_Profmax_06=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(06),u_Profmax(06));
MC_Profmax_05=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(05),u_Profmax(05));
MC_Profmax_04=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(04),u_Profmax(04));
MC_Profmax_03=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(03),u_Profmax(03));
MC_Profmax_02=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(02),u_Profmax(02));
MC_Profmax_01=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(01),u_Profmax(01));

```

```

MC_hpi_12=norminv(rand(NumIter,1),hpi(12),u_hpi(12));
MC_hpi_11=norminv(rand(NumIter,1),hpi(11),u_hpi(11));
MC_hpi_10=norminv(rand(NumIter,1),hpi(10),u_hpi(10));
MC_hpi_09=norminv(rand(NumIter,1),hpi(09),u_hpi(09));
MC_hpi_08=norminv(rand(NumIter,1),hpi(08),u_hpi(08));
MC_hpi_07=norminv(rand(NumIter,1),hpi(07),u_hpi(07));
MC_hpi_06=norminv(rand(NumIter,1),hpi(06),u_hpi(06));
MC_hpi_05=norminv(rand(NumIter,1),hpi(05),u_hpi(05));
MC_hpi_04=norminv(rand(NumIter,1),hpi(04),u_hpi(04));
MC_hpi_03=norminv(rand(NumIter,1),hpi(03),u_hpi(03));
MC_hpi_02=norminv(rand(NumIter,1),hpi(02),u_hpi(02));
MC_hpi_01=norminv(rand(NumIter,1),hpi(01),u_hpi(01));

```

```

MC_Rind=norminv(rand(NumIter,1),Rind,u_Rind);

```

```

MC_vind=norminv(rand(NumIter,1),vind,u_vind);

```

```

MC_Eind=norminv(rand(NumIter,1),Eind,u_Eind);

```

```

MC_v=norminv(rand(NumIter,1),v,u_v);

```

```

MC_E0=norminv(rand(NumIter,1),E0,u_E0);

```

%%% Aplicação das equações para cálculo da incerteza por Monte Carlo - Udi

```

MC_Jsit_Ciclo12_Eq1=(MC_hpi_12.^2+(2.*MC_Profmax_12.*MC_Rind-
MC_Profmax_12.^2))./(2.*MC_hpi_12);
MC_Jsit_Ciclo12_Eq2=((MC_Profmax_12-
MC_hpi_12).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo12_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo12_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo12_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo12_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo12_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo12_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo12_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_12.*(MC_Profmax_12-MC_hpi_12-
(MC_Fmax_12./MC_Jsit_Ciclo12_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo11_Eq1=(MC_hpi_11.^2+(2.*MC_Profmax_11.*MC_Rind-
MC_Profmax_11.^2))./(2.*MC_hpi_11);
MC_Jsit_Ciclo11_Eq2=((MC_Profmax_11-
MC_hpi_11).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo11_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo11_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo11_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo11_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo11_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo11_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo11_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_11.*(MC_Profmax_11-MC_hpi_11-
(MC_Fmax_11./MC_Jsit_Ciclo11_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo10_Eq1=(MC_hpi_10.^2+(2.*MC_Profmax_10.*MC_Rind-
MC_Profmax_10.^2))./(2.*MC_hpi_10);
MC_Jsit_Ciclo10_Eq2=((MC_Profmax_10-
MC_hpi_10).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo10_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo10_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo10_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo10_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo10_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo10_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo10_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_10.*(MC_Profmax_10-MC_hpi_10-
(MC_Fmax_10./MC_Jsit_Ciclo10_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo09_Eq1=(MC_hpi_09.^2+(2.*MC_Profmax_09.*MC_Rind-
MC_Profmax_09.^2))./(2.*MC_hpi_09);
MC_Jsit_Ciclo09_Eq2=((MC_Profmax_09-
MC_hpi_09).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo09_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo09_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo09_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo09_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo09_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo09_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo09_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_09.*(MC_Profmax_09-MC_hpi_09-
(MC_Fmax_09./MC_Jsit_Ciclo09_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo08_Eq1=(MC_hpi_08.^2+(2.*MC_Profmax_08.*MC_Rind-
MC_Profmax_08.^2))./(2.*MC_hpi_08);
MC_Jsit_Ciclo08_Eq2=((MC_Profmax_08-
MC_hpi_08).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo08_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo08_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo08_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo08_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo08_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo08_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo08_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_08.*(MC_Profmax_08-MC_hpi_08-
(MC_Fmax_08./MC_Jsit_Ciclo08_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo07_Eq1=(MC_hpi_07.^2+(2.*MC_Profmax_07.*MC_Rind-
MC_Profmax_07.^2))./(2.*MC_hpi_07);
MC_Jsit_Ciclo07_Eq2=((MC_Profmax_07-
MC_hpi_07).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo07_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo07_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo07_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo07_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo07_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo07_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo07_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_07.*(MC_Profmax_07-MC_hpi_07-
(MC_Fmax_07./MC_Jsit_Ciclo07_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo06_Eq1=(MC_hpi_06.^2+(2.*MC_Profmax_06.*MC_Rind-
MC_Profmax_06.^2))./(2.*MC_hpi_06);
MC_Jsit_Ciclo06_Eq2=((MC_Profmax_06-
MC_hpi_06).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo06_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo06_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo06_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo06_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo06_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo06_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo06_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_06.*(MC_Profmax_06-MC_hpi_06-
(MC_Fmax_06./MC_Jsit_Ciclo06_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo05_Eq1=(MC_hpi_05.^2+(2.*MC_Profmax_05.*MC_Rind-
MC_Profmax_05.^2))./(2.*MC_hpi_05);
MC_Jsit_Ciclo05_Eq2=((MC_Profmax_05-
MC_hpi_05).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo05_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo05_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo05_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo05_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo05_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo05_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo05_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_05.*(MC_Profmax_05-MC_hpi_05-
(MC_Fmax_05./MC_Jsit_Ciclo05_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo04_Eq1=(MC_hpi_04.^2+(2.*MC_Profmax_04.*MC_Rind-
MC_Profmax_04.^2))./(2.*MC_hpi_04);
MC_Jsit_Ciclo04_Eq2=((MC_Profmax_04-
MC_hpi_04).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo04_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo04_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo04_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo04_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo04_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo04_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo04_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_04.*(MC_Profmax_04-MC_hpi_04-
(MC_Fmax_04./MC_Jsit_Ciclo04_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo03_Eq1=(MC_hpi_03.^2+(2.*MC_Profmax_03.*MC_Rind-
MC_Profmax_03.^2))./(2.*MC_hpi_03);
MC_Jsit_Ciclo03_Eq2=((MC_Profmax_03-
MC_hpi_03).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo03_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo03_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo03_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo03_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo03_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo03_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo03_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_03.*(MC_Profmax_03-MC_hpi_03-
(MC_Fmax_03./MC_Jsit_Ciclo03_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo02_Eq1=(MC_hpi_02.^2+(2.*MC_Profmax_02.*MC_Rind-
MC_Profmax_02.^2))./(2.*MC_hpi_02);
MC_Jsit_Ciclo02_Eq2=((MC_Profmax_02-
MC_hpi_02).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo02_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo02_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo02_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo02_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo02_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo02_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo02_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_02.*(MC_Profmax_02-MC_hpi_02-
(MC_Fmax_02./MC_Jsit_Ciclo02_Eq4));

```

```

MC_Jsit_Ciclo01_Eq1=(MC_hpi_01.^2+(2.*MC_Profmax_01.*MC_Rind-
MC_Profmax_01.^2))./(2.*MC_hpi_01);
MC_Jsit_Ciclo01_Eq2=((MC_Profmax_01-
MC_hpi_01).*MC_Rind.*MC_Jsit_Ciclo01_Eq1)./(MC_Jsit_Ciclo01_Eq1-MC_Rind);
MC_Jsit_Ciclo01_Eq3=sqrt(MC_Jsit_Ciclo01_Eq2);
MC_Jsit_Ciclo01_Eq4=(2*MC_Jsit_Ciclo01_Eq3)./((1-MC_v.^2)./MC_E0+(1-
MC_vind.^2)./MC_Eind);
MC_Jsit_Ciclo01_EqFINAL=0.5*MC_Fmax_01.*(MC_Profmax_01-MC_hpi_01-
(MC_Fmax_01./MC_Jsit_Ciclo01_Eq4));

```

```
MC_Jsit(1:12)=0;
MC_Jsit(12)=std(MC_Jsit_Ciclo12_EqFINAL);
MC_Jsit(11)=std(MC_Jsit_Ciclo11_EqFINAL);
MC_Jsit(10)=std(MC_Jsit_Ciclo10_EqFINAL);
MC_Jsit(09)=std(MC_Jsit_Ciclo09_EqFINAL);
MC_Jsit(08)=std(MC_Jsit_Ciclo08_EqFINAL);
MC_Jsit(07)=std(MC_Jsit_Ciclo07_EqFINAL);
MC_Jsit(06)=std(MC_Jsit_Ciclo06_EqFINAL);
MC_Jsit(05)=std(MC_Jsit_Ciclo05_EqFINAL);
MC_Jsit(04)=std(MC_Jsit_Ciclo04_EqFINAL);
MC_Jsit(03)=std(MC_Jsit_Ciclo03_EqFINAL);
MC_Jsit(02)=std(MC_Jsit_Ciclo02_EqFINAL);
MC_Jsit(01)=std(MC_Jsit_Ciclo01_EqFINAL);
```

```
MC_Udi_Jsit = MC_Jsit;
u_Vet_Udi_Jsit=Udi+MC_Udi_Jsit;

regressao_Jsit_Udi = polyfit(Aeqi,u_Vet_Udi_Jsit,1);
u_Jsit = regressao_Jsit_Udi(1)-Jsit;
```

%%%%%%%%%%
%

% Cálculo da incerteza de Kiic

```
MC_Jsit_K=norminv(rand(NumIter,1),Jsit,u_Jsit);
```

```
MC_Kiic_Eq1=sqrt((MC_E0./(1-MC_v.^2)).*MC_Jsit_K./1000);
```

```
u_Kiic=std(MC_Kiic_Eq1);
```

```
U_Kiic=2*std(MC_Kiic_Eq1)
```

% Cálculo da incerteza de Kic

```
MC_Kiic_K=norminv(rand(NumIter,1),Kiic,std(MC_Kiic_Eq1));
```

```
MC_alfa=norminv(rand(NumIter,1),alfa,0.01*alfa/sqrt(3));
```

```
MC_Kic_Eq1=MC_Kiic_K./MC_alfa;
```

```
u_Kic=std(MC_Kic_Eq1);
```

```
U_Kic=2*std(MC_Kic_Eq1)
```

APÊNDICE V – CÓDIGO EM MATLAB PARA O CÁLCULO DA INCERTEZA DA TENACIDADE À FRATURA OBTIDA PELA METODOLOGIA DE YU et al. (2023)

```
% Rotina de leitura do arquivo de texto com os dados
fileID = fopen('dados3.txt','r');
formatSpec = '%f %f %f %f %f %d';
sizeA = [6 9050];
Dados = fscanf(fileID,formatSpec,sizeA);
transpose(Dados);

% Declaração das variáveis

a1=(-0.000064750772);
a2=0.25938125;
a3=8.1860291;
b1=0.0000053706601;
b2=(-0.048665977);
b3=9.4224328;
c1=(-0.00000077011863);
c2=0.0040923521;
c3=2.4312379;

n=0.1;
omega=0.75;

bm=0.2285;%0.127584260547316; % Valor extraído da curva de  $F_{max}/4a^2$  versus  $a/R_{ind}$ 

h_cr=0.0107229238; % Valor extraído da curva de  $P_{mcr}$  versus  $h_{cr}$ 

Rind=0.383333333333;
vind=0.23;
```



```
Eind=710000;
```

```
v=0.3;
```

```
E0=210241.66;
```

```
alfa=0.35;
```

```
NumIter=1000000;
```

```
Res_Fmax=0.001; % Resolução da célula de carga
```

```
Res_Profmax=0.0001; % resolução do LVDT
```

```
calib_Fmax=2*Res_Fmax; % Incerteza da calibração da célula de carga
```

```
calib_Profmax=0.5*Res_Profmax; % Incerteza da calibração do LVDT
```

```
k_Fmax_calib=2; %Fator de abrangência da calibração da célula de carga
```

```
k_Profmax_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do LVDT
```

```
% Leituras do raio do indentador Rind
```

```
Rind_leitura(1)=0.38235;
```

```
Rind_leitura(2)=0.38235;
```

```
Rind_leitura(3)=0.38530;
```

```
DesvPad_Rind=std(Rind_leitura);
```

```
Rind_res=0.0001;
```

```
calib_Rind=2*Rind_res; % Incerteza da calibração do Raio do Indentador
```

```
k_Rind_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do Raio do Indentador
```

```
% Leituras do módulo de elasticidade E0
```

```
E0_leitura(1)=209878.8;
```

```
E0_leitura(2)=208656.7;
```

```
E0_leitura(3)=210452.7;
```

```
E0_leitura(4)=211255.1;
```

```
E0_leitura(5)=210965.0;
```

```
DesvPad_E0=std(E0_leitura);
```

```
E0_res=0.1;
```

```
calib_E0=0.0013*mean(E0_leitura); % Incerteza da calibração do Raio do Indentador
```

```
k_E0_calib=2; %Fator de abrangência da calibração do Raio do Indentador
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%Rotina de aquisicao do valor maximo de forca do ciclo 12
```

```
Ciclo_br = Dados(6,:);
```

```
Ciclo = transpose(Ciclo_br);
```

```
Forca_br = Dados(3,:);
```

```
Forca = transpose(Forca_br);
```

```
MatForca = [Forca Ciclo];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxForca12,IForca12] = max(MatForca(1:size(MatForca)));
```

```
LimInfForca12 = IForca12-7;
```

```
LimSupForca12 = IForca12+7;
```

```
Fmax(1:12)=0;
```

```
Fmax(12) = MaxForca12;
```

```
%Vetor com os 15 valores para calculo do desvio padrão do ciclo 12
```

```
VetForca12 = Forca(LimInfForca12:LimSupForca12);
```

```
DesvPad_VetForca12 = std(VetForca12);
```

```
DesvPad_Fmax(1:12)=0;
```

```
DesvPad_Fmax(12)=DesvPad_VetForca12;
```

```
%%% Rotina para zerar os valores de força do ciclo 12
```

```
MatForca1=size(MatForca);
```

```
MatForca2=MatForca1(1);
```

```
for i = 1:MatForca2
```

```
    if MatForca(i,2) == 12;
```

```
        MatForca(i,1) = 0;
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Rotina de aquisição do valor máximo de profundidade do ciclo 12
```

```
Ciclo_br = Dados(6,:);
```

```
Ciclo = transpose(Ciclo_br);
```

```
Prof_br = Dados(2,:);
```

```
Prof = transpose(Prof_br);
```

```
MatProf = [Prof Ciclo];
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
[MaxProf12,IProf12] = max(Prof);
```

```
LimInfProf12 = IProf12-7;
```

```
LimSupProf12 = IProf12+7;
```

```
Profmax(1:12)=0;
```

```
Profmax(12) = MaxProf12;
```

```
%Vetor com os 15 valores para cálculo do desvio padrão do ciclo 12
```

```
VetProf12 = Prof(LimInfProf12:LimSupProf12);
```

```
DesvPad_VetProf12 = std(VetProf12);
```

```
DesvPad_Profmax(1:12)=0;
```

```
DesvPad_Profmax(12)=DesvPad_VetProf12;
```

%%%Rotina para zerar os valores de profundidade do ciclo 12

MatProf1=size(MatProf);

MatProf2=MatProf1(1);

for i = 1:MatProf2

 if MatProf(i,2) == 12;

 MatProf(i,1) = 0;

 end

end

%Cálculo de Si e hpi do ciclo 12 (coeficiente angular da reta)

Lim_Si12 = IProf12+200;

VetSiProf12 = Prof(IProf12:Lim_Si12);

VetSiForca12 = Forca(IProf12:Lim_Si12);

regressao_12 = polyfit(VetSiProf12,VetSiForca12,1);

Si_12 = regressao_12(1);

CoefLin_12 = regressao_12(2);

hpi_12 = -1*CoefLin_12/Si_12;

Si(1:12)=0;

Si(12)=Si_12;

hpi(1:12)=0;

hpi(12)=hpi_12;

%Cálculo de aeffi do ciclo 12

aeffi_12_01=(hpi(12)^2+(2*Profmax(12)*Rind-Profmax(12)^2))/(2*hpi(12));

```

aeffi_01(1:12)=0;
aeffi_01(12)=aeffi_12_01;

aeffi_12_02=((Profmax(12)-hpi(12))*Rind*aeffi_01(12))/(aeffi_01(12)-Rind);
aeffi_02(1:12)=0; % Não repetir
aeffi_02(12)=aeffi_12_02;

aeffi_12_FINAL=sqrt(aeffi_02(12));
aeffi_FINAL(1:12)=0;
aeffi_FINAL(12)=aeffi_12_FINAL;

%Cálculo de Eeffi do ciclo 12

Eeffi_12=(1-v^2)/((2*aeffi_FINAL(12)/Si(12)-((1-vind^2)/Eind)));
Eeffi(1:12)=0;
Eeffi(12)=Eeffi_12;

%Cálculo de Di do ciclo 12

Di_12=1-(Eeffi(12)/E0);
Di(1:12)=0;
Di(12)=Di_12;

% Cálculo de S0i do ciclo 12

S0i_12=(2*aeffi_FINAL(12))/((1-v^2)/E0+(1-vind^2)/Eind);
S0i(1:12)=0;
S0i(12)=S0i_12;

% Cálculo de Aeqi do ciclo 12

```

```
Aeqi_12=3.14159265359*(aeffi_FINAL(12)^2)*Di(12);
```

```
Aeqi(1:12)=0;
```

```
Aeqi(12)=Aeqi_12;
```

```
% Cálculo de Udi do ciclo 12
```

```
Udi_12=0.5*Fmax(12)*(Profmax(12)-hpi(12)-(Fmax(12)/S0i(12)));
```

```
Udi(1:12)=0;
```

```
Udi(12)=Udi_12;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Cálculo de hc_aster, a e Eta-n
```

```
hc_aster=Profmax(12)-omega*(Fmax(12)/Si(12));
```

```
a=sqrt((5*(2-n))/(2*(4+n))*(2*Rind*hc_aster-(hc_aster)^2));
```

```
n_Eta = Fmax(12)/(4*a^2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Cálculo da tenacidade à fratura Kic
```

```
A_E_sigmay=a1*(E0/(bm*n_Eta))^2+a2*(E0/(bm*n_Eta))+a3;
```

```
B_E_sigmay=b1*(E0/(bm*n_Eta))^2+b2*(E0/(bm*n_Eta))+b3;
```

```
C_E_sigmay=c1*(E0/(bm*n_Eta))^2+c2*(E0/(bm*n_Eta))+c3;
```

```
Pmcr_sigmay=A_E_sigmay*n^2+B_E_sigmay*n+C_E_sigmay;
```

```
Pmcr=Pmcr_sigmay*(bm*n_Eta);
```

```
Jic_iit=Pmcr*h_cr;
```

```
Kjc_iit=sqrt(0.001*E0*Jic_iit/(1-v^2));
```

$$K_{ic} = K_{jc_iit} / 0.35$$
[illegible]

% Cálculo da incerteza de n_Eta

```
u_Fmax=DesvPad_Fmax(12)/sqrt(15);
```

$$u_Rind = \sqrt{((DesvPad_Rind)/\sqrt{3})^2 + (Rind_res/(2*\sqrt{3}))^2 + (calib_Rind/k_Rind_calib)^2);}$$

```
u_Profmax=DesvPad_Profmax(12)/sqrt(15);
```

```
u_omega=0.01*omega/sqrt(3);
```

$$u_{Si} = 0.0001 * Si_{12} / \sqrt{3};$$

```
u_n=0.01*n/sqrt(3);
```

```
MC Fmax 12=norminv(rand(NumIter,1),Fmax(12),u Fmax);
```

```
MC_Rind=norminv(rand(NumIter,1),Rind,u_Rind);
```

```
MC_Profmax_12=norminv(rand(NumIter,1),Profmax(12),u_Profmax);
```

```
MC_omega=norminv(rand(NumIter,1),omega,u_omega);
```

```
MC Si=norminv(rand(NumIter,1),Si(12),u Si);
```

```
MC_n=norminv(rand(NumIter,1),n,u_n);
```

$$\text{MC n Eta Eq1} = (\text{MC Profmax 12} - \text{MC omega} * \text{MC Fmax 12} / \text{MC Si})^2;$$
$$MC \ n \ \text{Eta} \ \text{Eq2}=2.*MC \ \text{Rind}.*(MC \ \text{Profmax} \ 12-MC \ \text{omega}.*MC \ \text{Fmax} \ 12./MC \ \text{Si});$$
$$MC_n = \frac{5 \cdot (2 - MC_n)}{2 \cdot (4 + MC_n)}$$
$$\text{MC_n_Eta_EqFINAL} = \text{MC_Fmax_12} ./ (4 .* (\text{MC_n_Eta_Eq3} .* (\text{MC_n_Eta_Eq2} - \text{MC_n_Eta_Eq1})));$$

```
u n Eta=std(MC n Eta EqFINAL);
```

[illegible]

% Cálculo da incerteza de Pmcr

```

u_a1=0.05*abs(a1)/sqrt(3);
u_a2=0.05*abs(a2)/sqrt(3);
u_a3=0.05*abs(a3)/sqrt(3);
u_b1=0.05*abs(b1)/sqrt(3);
u_b2=0.05*abs(b2)/sqrt(3);
u_b3=0.05*abs(b3)/sqrt(3);
u_c1=0.05*abs(c1)/sqrt(3);
u_c2=0.05*abs(c2)/sqrt(3);
u_c3=0.05*abs(c3)/sqrt(3);
u_n=0.01*n/sqrt(3);
u_bm=0.05*bm/sqrt(3);
u_E0=sqrt((DesvPad_E0/sqrt(5))^2+(E0_res/(2*sqrt(3)))^2+(calib_E0/k_E0_calib)^2);

```

```

MC_a1=norminv(rand(NumIter,1),a1,u_a1);
MC_a2=norminv(rand(NumIter,1),a2,u_a2);
MC_a3=norminv(rand(NumIter,1),a3,u_a3);
MC_b1=norminv(rand(NumIter,1),b1,u_b1);
MC_b2=norminv(rand(NumIter,1),b2,u_b2);
MC_b3=norminv(rand(NumIter,1),b3,u_b3);
MC_c1=norminv(rand(NumIter,1),c1,u_c1);
MC_c2=norminv(rand(NumIter,1),c2,u_c2);
MC_c3=norminv(rand(NumIter,1),c3,u_c3);
MC_n=norminv(rand(NumIter,1),n,u_n);
MC_bm=norminv(rand(NumIter,1),bm,u_bm);
MC_n_Eta=norminv(rand(NumIter,1),n_Eta,u_n_Eta);
MC_E0=norminv(rand(NumIter,1),E0,u_E0);

```

```

MC_Pmcr_Eq1=MC_a1.*(MC_E0./(MC_bm.*MC_n_Eta)).^2+MC_a2.*(MC_E0./(MC_bm.
*MC_n_Eta))+MC_a3;
MC_Pmcr_Eq2=MC_b1.*(MC_E0./(MC_bm.*MC_n_Eta)).^2+MC_b2.*(MC_E0./(MC_bm.
*MC_n_Eta))+MC_b3;

```



```

MC_Pmcr_Eq3=MC_c1.*(MC_E0./(MC_bm.*MC_n_Eta)).^2+MC_c2.*(MC_E0./(MC_bm.
*MC_n_Eta))+MC_c3;
MC_Pmcr_Eq4=MC_Pmcr_Eq1.*(MC_n.^2)+MC_Pmcr_Eq2.*MC_n+MC_Pmcr_Eq3;
MC_Pmcr_EqFINAL=MC_Pmcr_Eq4.*(MC_bm.*MC_n_Eta);

u_Pmcr=std(MC_Pmcr_EqFINAL);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Cálculo da incerteza de hcr

```

```

u_h_cr=0.05*h_cr/sqrt(3);
MC_h_cr=norminv(rand(NumIter,1),h_cr,u_h_cr);

u_hcr=std(MC_h_cr);

```

```

% Cálculo da incerteza de Jic,iit

```

```

MC_Jic_iit=MC_Pmcr_EqFINAL.*MC_h_cr;
u_Jic_iit=std(MC_Jic_iit);

```

```

% Cálculo da incerteza de Kjc,iit

```

```

u_v=0.1*v/sqrt(3);
MC_v=norminv(rand(NumIter,1),v,u_v);

MC_Kjc_iit=sqrt(MC_E0.*MC_Jic_iit./(1-MC_v.^2)).*sqrt(0.001);
u_Kjc_iit=std(MC_Kjc_iit);

```

```

% Cálculo da incerteza de Kic

```

```
u_alfa=0.01*alfa/sqrt(3);  
MC_alfa=norminv(rand(NumIter,1),alfa,u_alfa);  
  
MC_Kic=MC_Kjc_iit./MC_alfa;  
u_Kic=std(MC_Kic)  
U_Kic=2*u_Kic
```

ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO (ALMEIDA, 2022)

A composição química do aço ensaiado é apresentada na Tabela AN1.1. Os valores em porcentagem de peso dos elementos químicos foram obtidos por meio de três medições utilizando-se um espectrômetro modelo Leco GDS 500A®.

Tabela AN1.1 – Composição química do aço 4130 M em percentual de peso. Fonte: Almeida (2022).

Elemento	Percentual de peso	Elemento	Percentual de peso
C	0,2900 ± 0,0020	Mo	0,6910 ± 0,0040
S	0,0032 ± 0,0011	V	0,0097 ± 0,0005
Mn	0,7690 ± 0,0050	P	0,0139 ± 0,0011
Si	0,3150 ± 0,0031	Al	0,0383 ± 0,0001
Cr	1,4800 ± 0,0115	Ti	0,0042 ± 0,0007
Cu	0,2160 ± 0,0012	Nb	0,0239 ± 0,0015
Ni	0,1260 ± 0,0031	B	0,0013 ± 0,0001

A microestrutura do aço 4130 M é basicamente composta por martensita e bainita com grãos de ferrita dispersos, como mostrado na Fig. AN1.1. Este material foi ensaiado como recebido. Sua dureza Rockwell C (HRC) foi medida conforme determina a norma ASTM E1820 (ASTM, 2018). Para tanto foi utilizado um durômetro Mitutoyo, da série Twintype Plus, modelo DT-20, com resolução de 0,1 HRC. O certificado de inspeção deste durômetro declara que ele possui uma incerteza de 0,4 HRC. Foram efetuadas cinco medições de dureza para cada corpo de prova e o valor médio é 27,0 HRC com uma incerteza padrão de 0,4 HRC para probabilidade de abrangência de 68,27 %. A Tabela AN1.1 contém o percentual de peso de cada elemento químico presente no aço 4130 M.

A Tabela AN1.2 contém os valores das leituras do módulo de elasticidade do material ensaiado com a média e o desvio padrão (ALMEIDA, 2022).

Tabela AN1. 2 – Valores do módulo de elasticidade do material ensaiado com a máquina de ensaio de tração Instron 8801, da média e do desvio padrão dos dados coletados. Fonte: Almeida (2022).

	Valores [MPa]
Medição 1	209 878,8
Medição 2	208 656,7
Medição 3	210 452,7
Medição 4	211 255,1
Medição 5	210 965,0
Média	210 241,7
Desvio Padrão	1 029,4

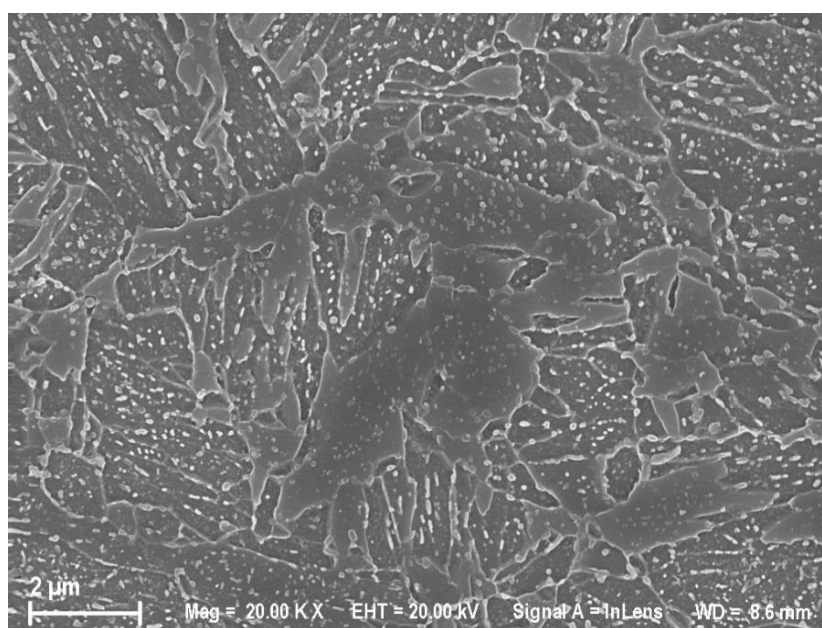


Figura AN1.1 - Microestrutura do aço 4130 M. Fonte: Almeida (2022).

Foram coletados os resultados de três ensaios de indentação instrumentada efetuados no aço 4130 M para obtenção dos valores de tenacidade à fratura. Em cada ensaio, foram realizados 12 ciclos de indentação com aplicação progressiva de força. Portanto, os valores de todas as variáveis e de todos os mensurandos foram calculados 12 vezes em um determinado ensaio.

O equipamento de indentação utilizado é equipado com um *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) de resolução 0,0001 mm e faixa nominal de 1,016 mm, que coleta os

valores de profundidade do indentador, e uma célula de carga de resolução 0,1 N e faixa nominal de 4 448,2 N, para medição dos valores de força aplicada. A temperatura na sala de medição foi mantida a $24,0 \pm 1,0$ °C durante a realização dos ensaios. Ela foi monitorada por meio de um termo-higrômetro de resolução 0,1 °C e faixa de medição de -20,0 a 60,0 °C.

Por não haver informações de certificados de calibração relativas ao raio do indentador, a variável R_{ind} (raio do indentador) foi medida utilizando-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do fabricante Zeiss, modelo Supra 40, de resolução 0,0001 mm. Assim sendo, é possível fazer o tratamento estatístico dos dados coletados, uma vez que são medidos três valores do referido raio.