

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**ESTUDO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA ANÁLISE DAS TENSÕES
RESIDUAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DO FURO CEGO**

Elisangela Pelizzari

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

**ESTUDO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA ANÁLISE DAS TENSÕES
RESIDUAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DO FURO CEGO**

Elisangela Pelizzari
Engenheira Metalúrgica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2013

CIP - Catalogação na Publicação

Pelizzari, Elisangela

Estudo da Incerteza de Medição na Análise das
Tensões Residuais através do Método do Furo Cego /
Elisangela Pelizzari. -- 2013.
102 f.

Orientador: Thomas Gabriel Rosauro Clarke.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2013.

1. Incerteza de Medição. 2. Tensões Residuais. 3.
Método do Furo Cego. I. Clarke, Thomas Gabriel
Rosauro, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Banca Examinadora:

Dr. Rafael Menezes Nunes
Prof. Dr. Afonso Reguly
Prof. Dr. Paulo H. S. Cardoso

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke pela orientação.

Ao Dr. Toni R. S. de Lima pelo suporte, ensinamento da área de não destrutivos, especificamente tensões residuais, e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker pela confiança e apoio por todos estes anos de LAMEF.

Ao PPGE3M.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos os amigos do LAMEF, que dê alguma maneira deram suporte para a realização deste trabalho, em especial aos colegas do GEND.

A minha família, meus pais e meus irmãos que sempre me incentivaram a persistir na atuação acadêmica.

Ao meu namorado Ângelo B. Bossle que está sempre junto comigo, me apoiando e incentivando a melhorar.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. TENSÕES RESIDUAIS.....	4
2.1.1. CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	5
2.1.2. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS.....	9
2.1.3. DIFRAÇÃO DE RAIO-X.....	10
2.2. MÉTODO DO FURO CEGO.....	13
2.2.1. DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA DO MFC.....	13
2.2.2. LIMITAÇÕES DO ENSAIO.....	17
2.2.3. TRATAMENTO MATEMÁTICO.....	19
2.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	25
2.3.1. CAUSAS E TRATAMENTO DE INCERTEZAS.....	26
2.3.2. TIPO DE FONTE DE INCERTEZA.....	29
2.3.3. ROTEIRO PARA CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	32
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	35
3.1. METODOLOGIA.....	35
3.1.1. DETERMINAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES DE INCERTEZA.....	36
3.1.2. DETERMINAÇÃO DO DESVIO DE REPETITIVIDADE.....	37
3.2. DETERMINAÇÃO DO ERRO DO OPERADOR.....	37
3.2.1. CONCEITOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA AMOSTRA.....	38
3.2.2. PROJETO DA AMOSTRA PARA APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO.....	40
3.2.3. CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA PARA APLICAÇÃO DE CARREGAMENTO A 4 PONTOS.....	42
3.3. CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	45
3.3.1. DESCRIÇÃO DA FONTE DE INCERTEZA.....	47
3.3.2. COEFICIENTE DE SENSIBILIDADE.....	48
3.4. MATERIAL.....	50
3.4.1. MÉTODOS.....	51
3.4.2. ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO-X.....	53
3.4.3. ENSAIO DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO DO FURO CEGO.....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	60
4.2. ENSAIO DE TRAÇÃO INSTRUMENTADO COM ERE E <i>CLIP GAGE</i>	62
4.3. ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO-X.....	62
4.4. TENSÃO MONITORADA NA FACE OPOSTA (LADO B) DAS AMOSTRAS.....	67
4.5. MÉTODO DO FURO CEGO.....	69

4.6.	CÁLCULO DO ERRO DO OPERADOR	72
4.7.	DESVIO PADRÃO DA REPETITIVIDADE	75
4.8.	HOMOGENEIDADE DAS TENSÕES NAS AMOSTRAS.....	77
4.9.	PLANILHA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	77
5.	<u>CONCLUSÕES</u>	81
6.	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</u>	82
7.	<u>REFERÊNCIAS</u>	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: A RELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA, TENSÃO E MICROESTRUTURA. ADAPTADO DE (BHADESHIA, 2002).	5
FIGURA 2: DISTRIBUIÇÃO COMPLETA DE TENSÕES RESIDUAIS NA MICROESTRUTURA DE UM MATERIAL. ADAPTADA DE (LONDINI, 2003).	6
FIGURA 3: SUPERPOSIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL σ_{RE} TENSÃO APLICADA σ_S . ADAPTADA DE (LU, 2002).	7
FIGURA 4: DIFRAÇÃO DA RADIAÇÃO, ONDE D = ESPAÇAMENTO ENTRE OS PLANOS DO RETICULADO, θ = ÂNGULO DE BRAGG E λ = COMPRIMENTO DE ONDA DA RADIAÇÃO (ADAPTADO DE (SCHAJER, 2013))....	11
FIGURA 5: DETERMINAÇÃO DA LARGURA A MEIA ALTURA (L.M.A) EM UM PICO DE DIFRAÇÃO (ADAPTADO DE (HE, 2009)).	12
FIGURA 6: GEOMETRIA ESQUEMÁTICA DE UMA ROSETA TÍPICA PARA MÉTODO DO FURO CEGO COM TRÊS ELEMENTOS NO SENTIDO HORÁRIO, A) CONFIGURAÇÃO DA ROSETA, B) DETALHE DO ERE. (ASTM E837)	17
FIGURA 7: INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS COEFICIENTES ajk (ADAPTADA DE (ASTM-E837, 2013)).....	20
FIGURA 8: MÉTODO DE KOCKELMANN: RELAÇÃO ENTRE CALIBRAÇÃO E CÁLCULO DAS TENSÕES (ADAPTADA DE (SOBOLEVSKI, 2007)).	24
FIGURA 9: DIAGRAMA DO MÉTODO DE ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO (ADAPTADO DE (PIZZOLATO, 2006)).	28
FIGURA 10: RESUMO DAS DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE (ADAPTADO DE (RS, 2009)).....	31
FIGURA 11: FLUXOGRAMA DOS PASSOS PARA A EXPRESSÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO (ADAPTADO DE (METROLÓGICA, 2009)).	33
FIGURA 12: FLUXOGRAMA QUE APRESENTA ESQUEMATICAMENTE A METODOLOGIA SEGUIDA NESTE TRABALHO.....	36
FIGURA 13: POSICIONAMENTO DOS ERE NO MONITORAMENTO DAS TENSÕES NA FACE OPOSTA.	39
FIGURA 14: DIAGRAMA DE ESFORÇOS CORTANTES (Q) E MOMENTO FLETOR (M) PARA O CASO DE UMA VIGA SUBMETIDA A SOLICITAÇÃO DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS.....	40
FIGURA 15: DIMENSÕES DA AMOSTRA PADRÃO E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO.....	42
FIGURA 16: VISTA FRONTAL DA MÁQUINA UTILIZADA PARA APLICAR CARGA A AMOSTRA.	43
FIGURA 17: APRESENTAÇÃO DA MÁQUINA PARA APLICAÇÃO DE CARGA POR FLEXÃO A QUATRO PONTOS JUNTAMENTE COM O SISTEMA DE CONTROLE DE PRESSÃO.....	44
FIGURA 18: VISTA DA BASE SUPERIOR COM A ABERTURA PARA O ACESSO DA FRESADORA.	44
FIGURA 19: DIAGRAMA DE ISHIKAWA DESCREVENDO AS POSSÍVEIS VARIÁVEIS PARA O MÉTODO DO FURO CEGO.	46
FIGURA 20: EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA. (A) MODELO L2A-06-062LT-120 DA VISHAY MICRO-MEASUREMENTS. (B) MODELO KFG-2-120-C1-11 DA KYOWA STRAIN GAGES.	52
FIGURA 21: ERE TRIAXIAL ESPECIAL PARA ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MFC.	54
FIGURA 22: POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS TIPO ROSETA NA AMOSTRA.	56
FIGURA 23: COMPUTADOR COM MGC PLUS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS, MÁQUINA UTILIZADA PARA APLICAÇÃO DE CARGA COM O APARELHO DO MFC INSTALADO E COMPUTADOR COM SPIDER 8 PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DO MFC.....	58
FIGURA 24: POSICIONAMENTO DA AMOSTRA E EQUIPAMENTO MONTADO.	59
FIGURA 25: TRIPÉ DO MÉTODO DO FURO CEGO MONTADO NA MÁQUINA E DETALHE DA FRESADORA COM A BROCA POSICIONADA NO CENTRO DA ROSETA.	59
FIGURA 26: METALOGRAFIA DO MATERIAL AISI 4140 RECOZIDO.	61
FIGURA 27: ANÁLISE DA POSIÇÃO CENTRAL DOS PICOS DE DIFRAÇÃO, MÉTODO DE CENTRO DE GRAVIDADE DO ÂNGULO THETA NO EIXO X.	63
FIGURA 28: AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO SEN^2 (PSI).	63
FIGURA 29: RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E DO FWHM PARA AMOSTRA 01.	64

FIGURA 30: RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO DE DIFRAÇÃO DE RAIO-X E DO FWHM PARA AMOSTRA 02.	64
FIGURA 31: RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO DE DIFRAÇÃO DE RAIO-X E DO FWHM PARA AMOSTRA 03.	65
FIGURA 32: RESULTADO DA COMPARAÇÃO DA TENSÃO MÍNIMA PRINCIPAL PARA OS QUATRO PONTOS MONITORADOS NA FACE OPOSTA NA AMOSTRA 01.....	67
FIGURA 33: RESULTADO DA COMPARAÇÃO DA TENSÃO MÍNIMA PRINCIPAL PARA OS QUATRO PONTOS MONITORADOS NA FACE OPOSTA NA AMOSTRA 02.....	68
FIGURA 34: RESULTADO DA COMPARAÇÃO DA TENSÃO MÍNIMA PRINCIPAL PARA OS QUATRO PONTOS MONITORADOS NA FACE OPOSTA NA AMOSTRA 03.....	68
FIGURA 35: RESULTADO DA TENSÃO MÁXIMA PRINCIPAL E DA TENSÃO MÍNIMA PRINCIPAL PARA A AMOSTRA 01.	70
FIGURA 36: RESULTADO DA TENSÃO MÁXIMA PRINCIPAL E DA TENSÃO MÍNIMA PRINCIPAL PARA A AMOSTRA 02.	70
FIGURA 37: RESULTADO DA TENSÃO MÁXIMA PRINCIPAL E DA TENSÃO MÍNIMA PRINCIPAL PARA A AMOSTRA 03.	71
FIGURA 38: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA TENSÃO MÁXIMA PRINCIPAL PARA OS QUATRO Furos DAS AMOSTRAS 01, 02 E 03, COM A LINHA DE MÍNIMO E DE MÁXIMO DAS TENSÕES MÁXIMAS PRINCIPAIS.	72
FIGURA 39: COMPARAÇÃO ENTRE AS AMOSTRAS DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO COM A PROFUNDIDADE.	74
FIGURA 40: COMPARAÇÃO ENTRE OS OPERADORES DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO COM A PROFUNDIDADE.	76
FIGURA 41: VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO TOTAL PELA PROFUNDIDADE.	76
FIGURA 42: PLANILHA DE INCERTEZA PARA O MÉTODO DO FURO CEGO PARA O INCREMENTO 3 NA DIREÇÃO "A".....	78
FIGURA 43: GUIA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES PRINCIPAIS MÍNIMAS PARA O INCREMENTO "3".	79
FIGURA 44: GUIA DA PLANILHA DE INCERTEZA QUE REPRESENTA A INCERTEZA MÍNIMA DE MEDIÇÃO GLOBAL DO ENSAIO DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O MÉTODO DO FURO CEGO.	80
FIGURA 45: PERFIS DE TENSÕES RESIDUAIS A PARTIR DA SUPERFÍCIE PARA A AMOSTRA 120_12_1.	86
FIGURA 46: PERFIS DE TENSÕES RESIDUAIS A PARTIR DA SUPERFÍCIE PARA A AMOSTRA 120_12_2.	87
FIGURA 47: PERFIS DE TENSÕES RESIDUAIS A PARTIR DA SUPERFÍCIE PARA A AMOSTRA 120_12_3.	87
FIGURA 48: PERFIS DE TENSÕES RESIDUAIS A PARTIR DA SUPERFÍCIE PARA A AMOSTRA 120_12_4.	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PRINCIPAIS TÉCNICAS PARA ESTUDO DE TENSÕES RESIDUAIS (ROSSINI, DASSISTI, <i>ET AL.</i> , 2012).	9
TABELA 2: ESQUEMA DE UM ARRANJO ORGANIZADO DAS GRANDEZAS, ESTIMATIVAS, INCERTEZAS PADRÃO, COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE E CONTRIBUIÇÕES DE INCERTEZAS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO (ADAPTADO DE (METROLÓGICA, 2009)).	34
TABELA 3: DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE PARA AS FONTES DE INCERTEZA.	47
TABELA 4: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL DE BASE. VALORES PERCENTUAIS EM PESO.	51
TABELA 5: CARACTERÍSTICAS DOS ERES.	52
TABELA 6: CARACTERÍSTICAS DO EXTENSÔMETRO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA UTILIZADO NO ENSAIO DO MFC.	54
TABELA 7: MEDIÇÕES DE DUREZA EM ROCKWELL C (HRC), A MÉDIA E O DESVIO PADRÃO DAS MEDIDAS.	61
TABELA 8: PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS NO ENSAIO DE TRAÇÃO.	62
TABELA 9: RESULTADOS DE TENSÕES RESIDUAIS NA DIREÇÃO LONGITUDINAL OBTIDOS ATRAVÉS DE ANÁLISE PELO MÉTODO DE DIFRAÇÃO POR RAIO-X.	66
TABELA 10: RESULTADOS DE TENSÕES RESIDUAIS NA DIREÇÃO TRANSVERSAL OBTIDOS ATRAVÉS DE ANÁLISE PELO MÉTODO DE DIFRAÇÃO POR RAIO-X.	66
TABELA 11: MÍNIMO E MÁXIMO VALOR PARA CADA PONTO E PARA CADA AMOSTRA NO MONITORAMENTO DAS TENSÕES NA FACE OPOSTA.	69
TABELA 12: VALORES DE TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS PARA TODOS OS PONTOS E AMOSTRAS.	73
TABELA 13: VALORES DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO PARA CADA AMOSTRA.	74
TABELA 14: VALORES DE MÉDIA E DESVIO PADRÃO TOTAL.	75
TABELA 15: SOMA DO DESVIO PADRÃO DA DIFRAÇÃO DE RAIO-X COM O DESVIO PADRÃO DO MONITORAMENTO DURANTE O CARREGAMENTO.	77

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO (1): LEI DE BRAGG.....	10
EQUAÇÃO (2): RELAÇÃO DE DEFORMAÇÃO DO ESPAÇAMENTO DO RETICULADO CRISTALINO	11
EQUAÇÃO (3): ALÍVIO DA TENSÃO DA SUPERFÍCIE MEDIDA PARA O CASO DE TENSÃO UNIFORME	19
EQUAÇÃO (4): ALÍVIO DE TENSÃO DA SUPERFÍCIE MEDIDA PARA O CASO DE TENSÃO NÃO UNIFORME	19
EQUAÇÃO (5): DEFORMAÇÃO RADIAL ALIVIADA	21
EQUAÇÃO (6): CAMPO DE TENSÕES RESIDUAIS EM SÉRIE POLINOMIAL DE POTÊNCIA	21
EQUAÇÃO (7): TENSÕES RESIDUAIS PARA OS DOIS PRIMEIROS TERMOS DA SÉRIE	22
EQUAÇÃO (8): CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO RELACIONADA COM CONSTANTES ELÁSTICAS E CARGA UNIAXIAL NA DIREÇÃO "X"	23
EQUAÇÃO (9): CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO RELACIONADA COM CONSTANTES ELÁSTICAS E CARGA UNIAXIAL NA DIREÇÃO "Y"	23
EQUAÇÃO (10): TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "A" DA ROSETA EXTENSOMÉTRICA.....	24
EQUAÇÃO (11): TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "B" DA ROSETA EXTENSOMÉTRICA.....	24
EQUAÇÃO (12): TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "C" DA ROSETA EXTENSOMÉTRICA	25
EQUAÇÃO (13): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL MÁXIMA PRINCIPAL COM A MÍNIMA PRINCIPAL.....	25
EQUAÇÃO (14): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "A" EM FUNÇÃO DE K_x	48
EQUAÇÃO (15): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "A" EM FUNÇÃO DE K_y	48
EQUAÇÃO (16): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "A" EM FUNÇÃO DE X_I	48
EQUAÇÃO (17): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "B" EM FUNÇÃO DE K_x	49
EQUAÇÃO (18): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "B" EM FUNÇÃO DE K_y	49
EQUAÇÃO (19): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "B" EM FUNÇÃO DE X_I	49
EQUAÇÃO (20): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "C" EM FUNÇÃO DE K_x	49
EQUAÇÃO (21): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "C" EM FUNÇÃO DE K_y	50
EQUAÇÃO (22): RELAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA DIREÇÃO "C" EM FUNÇÃO DE X_I	50

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CP – Corpo de prova

DRX – Difração de Raio-X

FWHM – *Full Width at Half Maximum*

GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*

Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LMA – Largura a meia altura

MFC – Método do Furo Cego

mm – milímetro

MPa – Megapascal

s – segundo

TN – *Technical Note*

TR – Tensões Residuais

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{a}_{jk} – Constante de calibração na profundidade j dentro da etapa k

\bar{b}_{jk} – Constante de calibração na profundidade j dentro da etapa k

D_0 – Diâmetro do furo

K_x – Constante elástica na direção x

K_y – Constante elástica na direção y

M_{max} – Momento fletor

\bar{a} – Constante de calibração

\bar{b} – Constante de calibração

c_i – Coeficiente de sensibilidade

d_0 – Espaçamento interplanar

$d_{\phi\psi}$ – Espaçamento interplanar médio na direção (ϕ, ψ)

u_c – Incerteza padrão combinada

x_N – Grandeza de entrada

ε_a – Deformação na direção a

ε_b – Deformação na direção b

ε_c – Deformação na direção c

ε_r – Deformação radial aliviada

ε_x – Deformação na direção x

ε_y – Deformação na direção y

$\varepsilon_{\phi\psi}$ – Deformação calculada

ν_{eff} – Graus efetivos de liberdade

ν_n – Graus de liberdade

σ_{CS} – Componente de tensão cisalhante

σ_R^I – Tensões residuais macroscópicas ou do tipo I

σ_R^{II} – Tensões residuais macroscópicas ou do tipo II

σ_R^{II} - Tensões residuais macroscópicas ou do tipo III

σ_{TR} – Tensão Residual

σ_a – Tensão na direção a

σ_b – Tensão na direção b

σ_c – Tensão na direção c

σ_e – Tensão limite de escoamento

σ_{eqb} – Componente de tensão equibiaxial

σ_{max} – Tensão máxima

σ_{min} – Tensão mínima

σ_x – Tensão na direção x

σ_y – Tensão na direção y

E – Módulo de elasticidade

k – Nível de confiança

Q – Esforço cortante

s – Desvio padrão

U – Incerteza expandida

d – Distância interplanar médio

α – Fase de um material

β – Fase de um material

ε – Deformação elástica

θ – Ângulo de espalhamento de Bragg

λ – Comprimento de onda incidente

ξ – Profundidade do furo referente ao diâmetro do furo

ν – Coeficiente de Poisson

RESUMO

Para muitos componentes e estruturas de engenharia a determinação precisa do estado de tensões residuais presente é de fundamental importância para a avaliação de sua integridade estrutural. O método do furo cego (MFC) é um dos métodos mais difundidos para a medição de tensões residuais, no entanto, por se tratar de um ensaio relativamente complexo, a determinação da sua incerteza de medição apresenta uma série de dificuldades, as quais se refletem na inexistência de estudos na literatura que abordem esse assunto de forma completa. Este trabalho tem como objetivo a determinação da incerteza de medição do MFC englobando todas as fontes de incerteza em potencial do método. Para tanto, foi elaborado um procedimento envolvendo a determinação e caracterização das fontes de incerteza tanto na parte experimental como no tratamento matemático dos dados. A partir da caracterização das fontes de incerteza detectou-se como fator principal na determinação da incerteza o erro do operador, que foi possível através do desvio de repetitividade. A fonte de incerteza devido ao erro do operador foi a de determinação mais complexa e envolveu o projeto e a construção de uma máquina especialmente desenvolvida para a aplicação de um estado de tensões homogêneo e que permitisse medir com precisão as tensões residuais com o método do furo cego. Técnicas de medição de tensões residuais por difração de raios-X e monitoramento de tensão com extensometria de resistência elétrica foram utilizadas para a verificação da homogeneidade das tensões nas amostras. A metodologia se mostrou adequada, conduzindo a resultados que permitiram determinar com sucesso a incerteza de medição através de planilhas eletrônicas.

Palavras-chave: Tensões residuais. Método do furo cego. Incerteza de medição. Desvio de repetitividade.

ABSTRACT

The characterization of the residual stress state of engineering components and structures is of fundamental importance for assessments of their structural integrity. The hole drilling method is one of the most commonly used methods; however, due to its relative complexity, quantifying its measurement uncertainties is not straightforward. It is a semi-destructive method, which means that multiple measurements cannot be repeated in a same location, and stress distributions mean that it is difficult to guarantee that a number of points in the same state will be available in a given volume.

This study suggests a global uncertainty measurement which includes a study of repeatability related to the operator. This is thought to be novel in the existing literature. For this, a standard sample and a machine which guarantees a homogeneous stress distribution in the sample were developed. To ensure the homogeneity of the stresses, x-ray diffraction measurements were performed. The results obtained show good repeatability for different operators and good results for the uncertainty of measurements for the method.

Key words: Residual stresses, Hole drilling method, Measurement uncertainty, operator repeatability.

1. INTRODUÇÃO

O estudo das tensões residuais, em muitos casos, é de suma importância para a avaliação da vida útil de um componente ou estrutura de engenharia. As tensões residuais somadas às tensões de trabalho podem reduzir bastante o fator de segurança de um projeto influenciando de forma significativa a vida em fadiga e a integridade estrutural do componente. Normas e códigos internacionais para avaliação de integridade estrutural, como a API 579 e BS 7910 (API-579, 2000) e (BS-7910, 2005), chamam a atenção para a necessidade das tensões residuais presentes no material serem consideradas nos cálculos, somando estas às tensões aplicadas externamente. Desta forma, é obtida a tensão efetiva a qual o material está sendo submetido durante o serviço.

Existem vários métodos que são utilizados para a determinação das tensões residuais. Cada método possui características específicas e a escolha do método mais adequado deve ser realizada a partir da análise de uma série de fatores como, natureza do material, profundidade de medição, tempo e custo de medição, precisão e dimensões da amostra.

O método do furo cego (MFC), normatizado pela ASTM E-837, é um dos métodos mais utilizados em todo o mundo para a determinação de tensões residuais. O princípio de ensaio consiste na usinagem de um furo com pequenas dimensões no centro de um extensômetro do tipo roseta triaxial. A usinagem é feita de forma incremental e para cada incremento de profundidade é realizado o registro das deformações nas três direções da roseta extensométrica. Uma das principais vantagens é permitir a determinação dos perfis das tensões máxima e mínima principal ao longo da profundidade a partir de um único ensaio (ASTM-E837, 2013).

Um ponto bastante importante para a confiabilidade dos resultados de qualquer método de ensaio é a determinação da incerteza de medição. No entanto, a determinação da sua incerteza de medição para o MFC é relativamente complexa devido a uma série de características do método, tanto na parte experimental quanto na parte do tratamento dos dados de ensaio. Várias etapas do ensaio são fortemente dependentes da habilidade do operador, como centragem e perpendicularidade da ferramenta de corte, velocidade de avanço, ajuste da profundidade zero e instalação do sensor. Portanto, trata-se de um ensaio no qual o erro devido ao operador pode ter grande influência na confiabilidade dos resultados

finais e é um dos pontos que devem ser avaliados para a determinação da incerteza de medição. A impossibilidade de repetição do ensaio para um mesmo ponto tem como consequência a necessidade de uma verificação paralela. Esta verificação requer a criação de uma amostra padrão com tensões residuais homogêneas em uma região de tamanho suficientemente grande para permitir a realização de medições em vários pontos.

O Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS conta com mais de 15 anos de experiência na realização de ensaios com o MFC e atualmente está buscando a acreditação deste ensaio junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Para tanto, devem ser atendidos os requisitos da norma NBR-17025 – “Requisitos Gerais para a Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração” (ABNT NBR ISO/IEC 17025, 2005). Do ponto de vista técnico, o requisito mais complexo de ser atendido é a determinação da incerteza de medição. Esse fato, somado a inexistência de estudos que abordem esse assunto de forma completa motivou a realização deste trabalho.

O objetivo principal deste trabalho é a determinação da incerteza de medição do MFC englobando todas as fontes de incerteza em potencial do método. Além disso, destacam-se alguns objetivos secundários: criação de planilhas eletrônicas para a determinação da incerteza de medição e projeto e construção de uma máquina de dimensões reduzidas e de fácil operação que possibilite a geração de campo homogêneo de tensões em uma amostra. Tal máquina deve permitir acesso à amostra de forma segura para a realização de ensaios como o MFC e para a instalação de sensores de diferentes técnicas de inspeção que possibilitem a verificação da sensibilidade dessas técnicas para a detecção de variações de tensão. Essa máquina também será utilizada para a realização de experimentos didáticos no LAMEF, servindo de apoio para a realização de aulas práticas.

A metodologia utilizada consistiu na elaboração de um procedimento que envolve a determinação e caracterização das fontes de incerteza tanto na parte experimental como no tratamento matemático dos dados. A fonte de incerteza devido ao erro do operador foi a de determinação mais complexa devido a necessidade de obtenção de amostras com estado homogêneo de tensões. Para tanto, foi necessário o projeto e a construção de uma máquina especialmente desenvolvida para a aplicação de um estado de tensões homogêneo e que permitisse medir com segurança as TR's com o método do furo cego. Para a

verificação da homogeneidade das tensões nestas amostras foram utilizadas técnicas de medição de tensões residuais por difração de raios-X e monitoramento de tensão com extensometria de resistência elétrica.

O fato de o MFC ser um ensaio que gera um grande volume de resultados também acaba tornando mais complexa a determinação da incerteza de medição. Num primeiro momento as incertezas foram calculadas para cada incremento de profundidade e, a partir desses valores, foi determinada a incerteza total.

A planilha da incerteza de, medição seguiu os passos de análise do “Guia para Expressão da Incerteza de Medição” (ISO GUM) (GUM, 2003) contendo todos os cálculos para a determinação da incerteza de outras fontes. No final do trabalho é apresentado um caso prático da utilização das planilhas de cálculo para a determinação da incerteza de medição.

O trabalho permitiu determinar com sucesso os valores de desvio de repetitividade dos operadores que somados as fontes de incertezas do método apresentam a incerteza de medição global para o ensaio de tensões residuais pelo método do furo cego.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tensões Residuais

Tensões residuais são tensões elásticas existentes em um componente sem a existência de carregamentos externos ou gradientes de temperatura. Todo sistema de tensões residuais está em equilíbrio sendo o somatório das forças resultantes e dos momentos produzidos iguais à zero. As tensões residuais são tensões no regime elástico, portanto, o valor máximo que poderá ser atingido, em módulo, é o próprio limite de escoamento “local” do material. Valores de tensões acima do limite de escoamento do material irão ocasionar uma deformação plástica do material, ocasionando uma redistribuição das tensões residuais (LU, 1996).

Do ponto de vista macroscópico, as tensões residuais aparecem como consequência das alterações impostas ao material pelos processos de manufatura, como usinagem, soldagem, tratamento térmico, etc. Tensões residuais também podem ser induzidas durante a vida útil do componente, por exemplo, por sofrer fadiga, variação de temperatura, deformação plástica, etc (HOLY, JANKOVEC, *et al.*, 2007).

As tensões residuais são consequência das interações entre tempo, temperatura, deformação e microestrutura como é apresentado na Figura 1. As características dos materiais que influenciam o desenvolvimento das tensões residuais incluem condutividade térmica, capacidade térmica, expansividade térmica, módulo elástico e coeficiente de Poisson, plasticidade, transformações termodinâmicas e cinéticas, transformações mecânicas e transformação plástica (BHADESHIA, 2002).

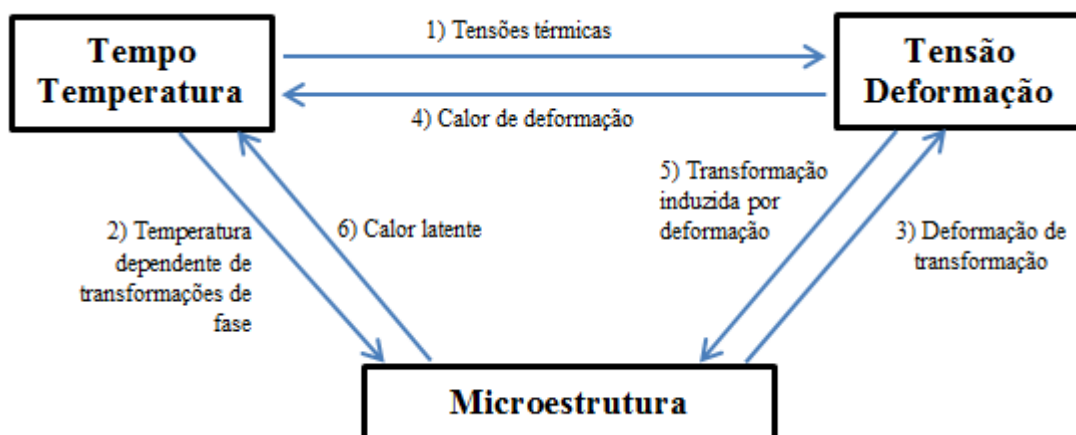


Figura 1: A relação entre temperatura, tensão e microestrutura. Adaptado de (BHADESHIA, 2002).

2.1.1. Classificação das tensões residuais

As tensões residuais em um componente não são necessariamente para manter o equilíbrio entre a peça e o ambiente. Estas podem também surgir a partir de gradientes térmicos, por exemplo, aqueles causados durante as operações de soldagem ou de tratamento térmico. Se mecânica ou termicamente induzidas, estas tensões podem ser vantajosas para a vida útil do componente, tal como no caso de jateamento (WITHERS e BHADESHIA, 2001).

As tensões macroscópicas que acabamos de descrever são do tipo I, porque elas variam continuamente ao longo de grandes distâncias. Isto as diferencia das tensões residuais microscópicas que variam ao longo da escala de grãos (tipo II ou tensões intergranulares) ou a escala atômica (tipo III) (WITHERS e BHADESHIA, 2001).

Segundo Lu as tensões residuais podem ser classificadas em três tipos (Tipo I, Tipo II e Tipo III), sendo estes (LU, 1996):

- Tensões residuais macroscópicas (Tipo I): Se distribuem em larga escala, se equilibrando por todo o componente. As macrotensões originam-se nos processos de manufatura e se superpõem às tensões externas aplicadas no componente.
- Tensões residuais microscópicas (Tipo II): Se distribuem em escala reduzida, que compreende certo número de grãos (em geral, de 3 a 10 vezes o

tamanho de grão). São originadas pela heterogeneidade e a anisotropia de cada cristal ou grão de um material policristalino.

- Tensões residuais microscópicas (Tipo III): Apresentam-se na escala atômica, relativas aos diferentes tipos de defeitos cristalinos.

As presenças de estados de tensões residuais apenas de tipo II e III são difíceis de ser caracterizadas, dependendo de métodos mais sofisticados para sua verificação. Geralmente, a distribuição de tensões residuais em um componente mecânico se apresenta de forma mais complexa, contendo a presença de tensões residuais macro e microscópicas, como representa a Figura 2.

Na figura percebe-se que σ^I (tensões residuais macroscópicas) representam o valor médio das macrotensões residuais atuando em cada fase e que estão distribuídas por toda a seção da peça. Enquanto isso, as porções referentes às microtensões residuais (σ^{II} , σ^{III}) referentes às fases α e β , têm suas distribuições em pequena escala e não se superpõem umas às outras.

No caso de materiais reais, o estado de tensão residual atual no ponto é feito a superposição de tensões do tipo σ^I , σ^{II} e σ^{III} , como ilustrado na Figura 2.

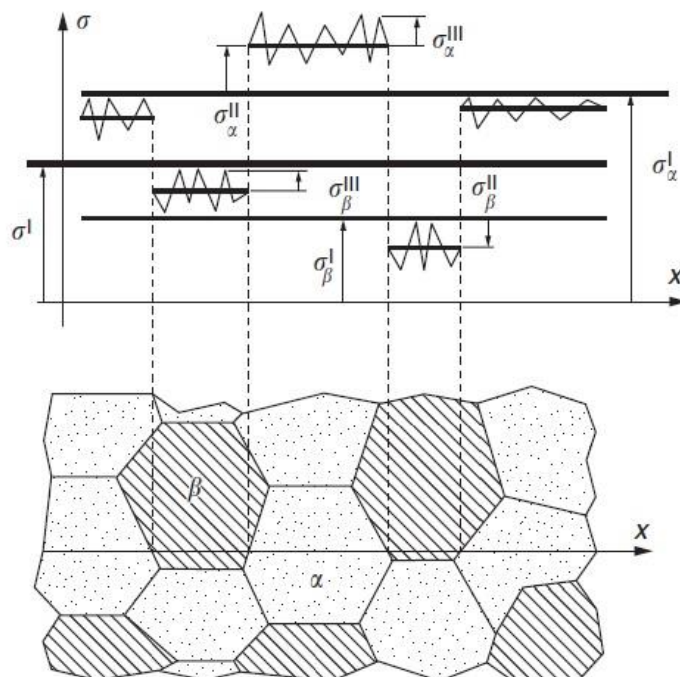


Figura 2: Distribuição completa de tensões residuais na microestrutura de um material. Adaptada de (LONDINI, 2003).

Quando um componente é submetido a um campo de tensões residuais elásticas, caracterizado pelo tensor σ_R , sobre o qual se sobrepõe um campo de tensões de serviço definido pelo tensor σ_S , a tensão real, para que a peça seja submetida é caracterizado pelo tensor $\sigma_R + \sigma_S$ como está apresentado na Figura 3. Se as tensões residuais são somadas as tensões de serviço (tensão trativa, por exemplo), a peça estará localmente sobrecarregada devido às tensões residuais. Se, ao contrário, uma operação de acabamento apropriada (jateamento ou rolo de polimento, por exemplo) é usada para introduzir tensões residuais compressivas, a peça é aliviada localmente por parte da carga e como resultado o desempenho mecânico do material é aumentado (LU, 2002).

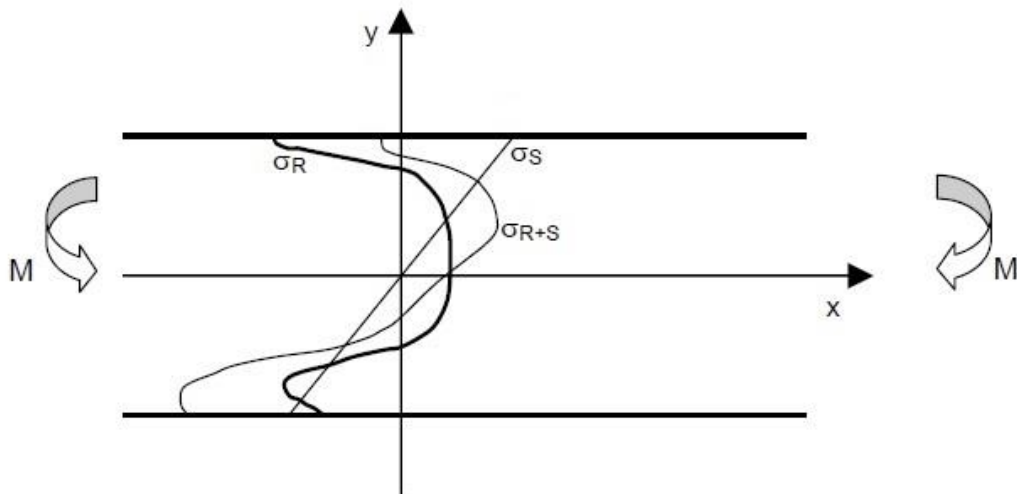


Figura 3: Superposição da tensão residual (σ_R) e tensão aplicada (σ_S). Adaptada de (LU, 2002).

EFEITO DAS TENSÕES RESIDUAIS

A identificação das tensões residuais no material é muito importante para a avaliação da integridade estrutural de componentes e estruturas de engenharia. Quando os valores de tensões residuais são positivos (trativos) se tornam fator predominante para contribuição na diminuição da vida em fadiga e de outras falhas estruturais. Tensões residuais compressivas, entretanto podem aumentar a vida em fadiga em alguns casos (HOLY, JANKOVEC, *et al.*, 2007).

As tensões residuais normalmente são originadas por processos complexos, a partir da combinação entre fatores de natureza mecânica, térmica e metalúrgica. Quando estas tensões estão presentes em um material ou componente estrutural

exercem uma grande influência no seu comportamento durante o serviço, dependendo de sua natureza, valor e orientação com relação às tensões de trabalho atuantes. As tensões residuais podem exercer efeitos favoráveis ou não, dependendo das condições de trabalho do componente analisado (SILVA JÚNIOR, MANSUR e PALMA, 1999). Os principais efeitos desfavoráveis são os seguintes:

- A nucleação e crescimento de trincas quando o material é exposto a ambientes agressivos;
- A nucleação e o crescimento de trincas quando o material é aquecido, envelhecido ou usinado;
- O empenamento do componente devido à redistribuição das tensões residuais presentes com a retirada de material em operações de usinagem ou corte e após tratamento térmico;
- Instabilidade dimensional;
- Diminuição da vida do material quando sujeito a carregamentos cíclicos, ou seja, aumento da probabilidade de ocorrência de falha por fadiga a um número de ciclos inferior ao esperado quando o estado de tensões residuais presente na superfície do material for de tração, dentre outros efeitos.

Como efeitos favoráveis relativos à presença de tensões residuais em um componente pode-se citar aqueles obtidos pela introdução de um padrão de tensões residuais de compressão na superfície do mesmo (SILVA JÚNIOR, MANSUR e PALMA, 1999), resultando em:

- Aumento na resistência à fadiga do material.
- Alívio das tensões residuais de tração presentes na superfície do material, que poderiam contribuir para a nucleação de trincas em processos de corrosão sob tensão.
- Melhoria no padrão de tensões residuais existente na superfície de materiais que tenham sido submetidos a operações de usinagem ou esmerilhamento.
- Redução dos efeitos prejudiciais de concentradores de tensão como entalhes, rasgos e descontinuidades superficiais, dentre outros.

2.1.2. Técnicas de Medição de Tensões Residuais

Segundo Lu (1996), as técnicas de medição de tensões residuais dividem-se de acordo com o grau de dano no componente e sua aplicação. A Tabela 1 apresenta as técnicas com suas descrições (LU, 1996), sendo:

- ✓ Não destrutivas: Neste caso, não precisam da remoção de material e não provocam nenhum dano;
- ✓ Destrutivas: São as técnicas que comprometem ou impossibilitam o uso do espécime medido; e,
- ✓ Semi-destrutivas: São as técnicas que introduzem algum dano no componente, porém, não comprometem sua integridade ou sua operação.

Tabela 1: Principais técnicas para estudo de tensões residuais (ROSSINI, DASSISTI, *et al.*, 2012).

Classificação	Principais Técnicas	Observações
Não destrutivos	Difração de Raio X	Variação das distâncias entre os planos atômicos.
	Difração de Nêutrons	Semelhante ao método de Raio X, no entanto, com inspeção em todo o volume.
	Difração de Síncrotron	Inspeção de modo triaxial em todo o volume.
	Método de Ultrassom	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material.
	Método Magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen.
Destrutivos	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças assimétricas, ex.: cilindros.
	Método da Remoção de Camadas ou Deflexão	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material.
Semi-destrutivos	Método do furo cego (ASTM-E837, 2013)	Execução de um furo, φ 0,8 a 3,2 mm, método normalizado pela ASTM E-837.

Pode-se perceber que não existe uma técnica universal que aplique a qualquer situação. Cada técnica tem suas vantagens e restrições e cabe ao analista definir aquela que corresponda às suas necessidades, levando-se em conta vários fatores, como por exemplo: exatidão, complexidade; aplicabilidade no campo; custos; necessidade de mão de obra especializada; necessidade de repetição dos testes; tipo de intervenção: destrutiva ou não destrutiva; existência de gradiente de

tensão; propriedades mecânicas do material; anisotropia; composição química; homogeneidade; geometria dos componentes e tempo de análise.

2.1.3. Difração de Raio-X

A técnica de difração de Raio-X analisa materiais policristalinos quando estes estão sob tensão aplicada ou residual. As tensões elásticas resultantes fazem com que ocorra uma alteração no espaçamento entre os planos atômicos da estrutura cristalina.

De acordo com a Lei de Bragg é possível determinar a distância interplanar no reticulado cristalino. A lei de Bragg é a maneira mais simples de descrever a difração de raio-X em materiais cristalinos. Na Figura 4 os raios-X incidentes atingem os planos cristalinos com um ângulo incidente θ e um ângulo de reflexão θ . O pico de difração é observado quando a condição de Bragg é satisfeito:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

Onde λ é o comprimento de onda, d é a distância entre os planos cristalinos adjacentes (espaçamento de d), θ é o ângulo de Bragg em que um pico de difração é observado, e n é um número inteiro, chamado de ordem de reflexão.

Para medição de tensão utilizando difração de raios-X, uma variedade de ângulos θ é aplicada e o ângulo em que é detectada a radiação mais intensa é estabelecido como o ângulo de Bragg. Pequenas mudanças nos espaços d que tendem a ampliar o pico difratado correspondem à reflexão de tensões do Tipo II e Tipo III. A medida das deformações no reticulado cristalino são quantidades absolutas, que é relativa a um dado de deformação zero. Esta é uma característica importante dos métodos de difração, pois permite a medição de tensões residuais bem como de tensões aplicadas. Na Figura 4 apresenta três segmentos do reticulado cristalino ilustrando a difração incidente e a difratada, juntamente com a distância dos planos do reticulado e o ângulo incidente (SCHAJER, 2013).

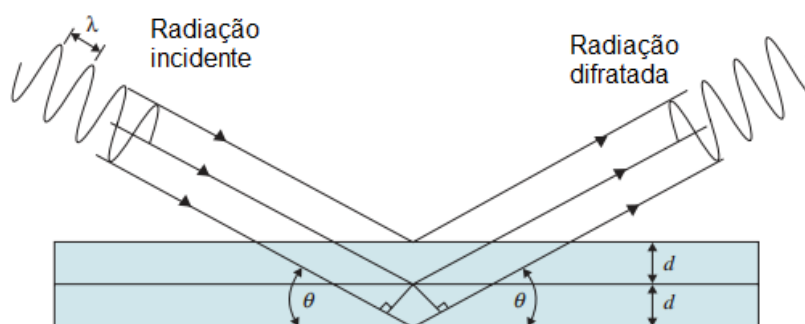


Figura 4: Difração da radiação, onde d = espaçamento entre os planos do reticulado, θ = ângulo de Bragg e λ = comprimento de onda da radiação (Adaptado de (SCHAJER, 2013)).

O resultado das mudanças no espaçamento interplanar pode ser calculado com a equação de Bragg para detectar deformação elástica ε através do conhecimento do comprimento de onda incidente λ e a mudança do ângulo de espalhamento de Bragg $\Delta\theta$.

Em um material com tensões residuais, o espaçamento pode ser usado como um sensor de deformação, dando a medida da deformação na direção do vetor de difração. Se d_0 são os espaçamentos do ângulo de Bragg medido para um material livre de tensões residuais e tendo conhecimento prévio deste parâmetro, as tensões podem ser calculadas utilizando a equação (2).

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad (2)$$

Onde $\varepsilon_{\phi\psi}$ é a estimativa de deformação calculada com base no cálculo da diferença no espaçamento para um material com tensões residuais $d_{\phi\psi}$, e no espaçamento para um material livre de tensões residuais d_0 . Evidentemente é necessário dispor de uma medida exata do d_0 (SCHWARZ e KOCKELMANN, 1993).

AVLIAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO PICO DE DIFRAÇÃO

O pico de difração é exibido como intensidades de difração a um intervalo de ângulos de 2θ . Para cristais perfeitos com instrumentação perfeita, o pico é uma

função de delta. O alargamento do pico pode ser devido a muitos efeitos, incluindo condições de imperfeições no cristal, tais como deformação, estrutura cristalina em mosaico, tamanho finito; condições ambientais, tal como vibração térmica em escala atômica; e condições de ensaio, tais como tamanho do feixe do raio-X, feixe divergente, distribuição do espectro do feixe, e resolução do detector. A linha curva forma um perfil de pico, o qual é a distribuição da intensidade difratada na vizinhança do ângulo de Bragg (HE, 2009).

O pico de difração pode ser analisado através da largura da curva de difração, esta análise se dá pelo parâmetro da função referente à largura da curva. O termo em inglês *full width at half maximum* (FWHM) refere-se à largura a meia altura (LMA). A largura a meia altura é determinada pela distribuição das distâncias orientadas randomicamente no plano do reticulado cristalino. As causas para a deformação do espaçamento interplanar: distribuições dos parâmetros do reticulado cristalino pelas ligações, ocupação dos sítios intersticiais, precipitações, micro distorção não direcionada criada por micro tensões. As microtensões não direcionadas podem ser originárias de deformações térmicas e/ou plásticas (alívio de tensão, escorregamento, maclação, falhas na sequência de empilhamento, diferentes orientações). Pequenos cristalitos também são contribuintes alargando as linhas de interferência (HAUK, 1997).

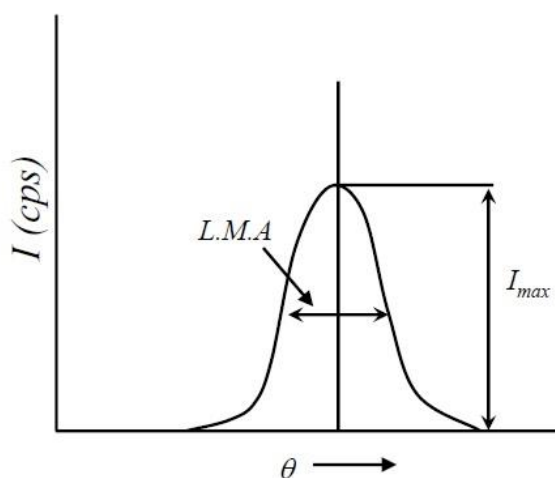


Figura 5: Determinação da largura a meia altura (L.M.A) em um pico de difração (Adaptado de (HE, 2009)).

A localização do pico de difração segundo Prevéy se dá através da transição do metal nos tubos de raio-X utilizados para medição de tensão que produzem um espectro contínuo de radiação branca e três linhas de intensidade elevada monocromáticas. As três linhas são $K\alpha_1$, $K\alpha_2$ e $K\beta$ tem radiações com comprimento de ondas conhecido com alta precisão. As linhas $K\alpha_1$ e $K\alpha_2$ diferem muito pouco no comprimento de onda para permitir a separação dos picos de difração produzidos. A linha $K\alpha_1$, de intensidade mais elevada, é nominalmente o dobro da linha $K\alpha_2$. A linha $K\beta$ é produzida a um comprimento de onda substancialmente mais curto e pode geralmente ser separado das linhas $K\alpha$ por filtração, pelo uso de detectores com alta resolução de energia, ou cristais monocromadores. A linha $K\beta$ é tipicamente um quinto da intensidade da linha $K\alpha_1$, e é geralmente fraca para medição de tensões residuais por difração de raio-X em superfícies deformadas plasticamente (PREVÉY, 1986).

2.2. Método do Furo Cego

2.2.1. Desenvolvimento da Técnica do MFC

O princípio do método do furo é relativamente simples. Um pequeno furo é usinado no componente, e as deformações aliviadas na superfície causadas pela introdução do furo, são medidas utilizando um extensômetro de resistência elétrica (ERE) do tipo roseta desenvolvida especialmente para o método. É possível então calcular as tensões residuais presentes no material originalmente no local do furo, a partir das deformações aliviadas por meio de uma série de cálculos (BARSANESCU e CARLESCU, 2004).

Mathar propôs pela primeira vez o conceito de utilizar o método do furo para a determinação das tensões residuais em 1934, utilizando um extensômetro mecânico para medir deslocamentos em torno de um furo circular através de uma placa. Em 1950, Soete e Vancrombrugge melhoraram a precisão da medição pela utilização de extensômetros de resistência elétrica em vez de extensômetro mecânico, embora neste ponto, o furo no centro do extensômetro tipo roseta que é bem comum hoje em dia não foi avaliado. Os primeiros estudos sobre o desenvolvimento da técnica de análise eram focados nas medições de espessura em folhas finas ou placas,

onde foi assumido que a tensão residual era distribuída uniformemente através da espessura. A solução para os componentes de espessura foi derivada mais tarde a partir de medições experimentais e empíricas. Kelsey realizou a primeira investigação para a variação de tensão residual com a profundidade utilizando o método do furo em 1956.

Rendler e Vigness progrediram no estudo sobre o método do furo em 1966 em um procedimento sistemático e reproduzível, como a aplicação moderna do método de perfuração para campos de tensão uniformes. Eles também foram os primeiros a definir a geometria da roseta para o método do furo da ASTM E837. Desde então, o número de trabalhos tem alargado a técnica, particularmente as práticas experimentais e através do desenvolvimento de rotinas de análise de dados mais precisos e abrangentes (RENDLER E VIGNESS, 1966). Em 1974, Procter e Beaney foram os primeiros a utilizar a técnica de abrasão a ar para método do furo livre de tensões, e o uso de uma turbina a ar para perfurar a ultra-alta velocidade (até ~400.000 rpm) foi introduzido primeiramente por Flaman em 1982 (FLAMAN, 1982).

Mais recentemente, o foco recaiu sobre a medição da variação das tensões residuais com a profundidade através do método do furo incremental e soluções em desenvolvimento para campos de tensões não uniformes. Modernas técnicas de computação e elementos finitos tem permitido o desenvolvimento dos procedimentos de cálculo de tensões residuais que não eram possíveis anteriormente (NIKU-LARA, LU e FLAVENOT, 1985). Schajer desenvolveu a primeira solução generalizada de elementos finitos da técnica incremental, incluindo tabulações dos coeficientes de calibração em 1981. Bijak-Zochowski foram os primeiros a propor um método para o cálculo de distribuição de tensões não uniformes em 1978 e Schajer novamente desenvolveu os coeficientes de calibração apropriados em 1988.

Tentativas também têm sido feitas para aumentar a precisão e a versatilidade da técnica, pela introdução de rosetas de seis ERE's para aumentar a sensibilidade da deformação, e a conicidade da perfuração com algum sucesso. Medições de campo de tensão também têm sido feitas utilizando interferometria a laser, holografia, interferometria moiré e mapeamento de deformação.

A precisão da técnica do furo cego com extensômetros de resistência elétrica, o método mais largamente utilizado para medir tensão residual, é diretamente

relatada para: 1) a excentricidade entre o centro do furo e o centro da roseta, respectivamente, e 2) a precisão das correções para a tendência de integração dos extensômetros (BARSANESCU e CARLESCU, 2004).

Rendler e Vigness observaram pela primeira vez que "a precisão do método estará diretamente relacionado com a habilidade do operador em posicionar a fresa precisamente no centro do extensômetro do tipo roseta" (RENDLER e VIGNESS, 1966).

Um erro devido à plasticidade na região ao redor do furo pode ser induzido se a magnitude das tensões residuais ao redor do furo exceder o limite de escoamento local. Em um carregamento uniaxial, o valor máximo do fator de concentração de tensão devido o furo é 3. Desta forma, a tensão nominal poderá exceder 1/3 do limite de escoamento, o escoamento plástico iniciará na borda do furo e as equações obtidas pela solução elásticas não serão mais válidas. No entanto, as equações podem ser utilizadas para determinar o desvio do valor verdadeiro da tensão elástica estimada. Se o erro é aceitável, as equações podem ser praticamente usadas para determinar a tensão além de 1/3 do limite de escoamento. Desta forma, se o erro induzido pela plasticidade local é negligenciado, a tensão medida será sempre superestimada (LIN e CHOU, 1995).

Este efeito tem sido considerado experimentalmente e analiticamente, e há um acordo substancial entre os diferentes investigadores de que os erros são insignificantes quando as tensões residuais são inferiores a 70% da tensão de escoamento (limite proporcional) do material para teste. Quando a tensão residual interna é igual à tensão do limite de escoamento, Procter e Bynum encontraram erros positivos de 10-30% na medida de tensão residual determinada experimentalmente. Estes resultados são aplicáveis às secções mais espessas onde são utilizados ensaios do método do furo cego. Nickola encontrou um erro negligenciável quando as tensões residuais foram inferiores a 70% do limite proporcional através do caso do furo. No entanto, estes dados sugerem erros mensuráveis maiores (erros de 20-50% são obtidos em vários materiais) quando a tensão residual era igual à tensão de escoamento (LIN e CHOU, 1995) e (MARTINS, 2004).

Durante o decurso dos ensaios transcorridos utilizando o método do furo cego, verificou-se que os coeficientes de calibração sugeridos pela norma ASTM

E837 para cálculos de tensão residual estão sujeitas às seguintes limitações (ASTM-E837, 2013):

- (i) a magnitude da tensão residual não deve exceder 50% do valor do limite de elasticidade do material.
- (ii) assume-se que o campo de tensões da amostra não varia significativamente com a profundidade.

Em relação à segunda limitação, um estudo realizado por Bynum mostrou que a influência do gradiente de tensão sobre o resultado final não era aparente, e, na maioria dos testes, a diferença foi dentro da gama de $\pm 8\%$. Assim, para ultrapassar a primeira limitação, uma série de amostras calibradas foram concebidas e testadas (ALEXANDRU e BULANCEA, 2002).

Em 1993, Kockelmann apresentou um método alternativo para o cálculo das tensões residuais distribuídas de maneira não uniforme com a profundidade, através da utilização de dados experimentais para a calibração. Neste mesmo ano, a empresa Micro Measurements lançou a Nota Técnica TN-503-4, indicando um procedimento básico para a determinação das tensões residuais uniformes em componentes mecânicos (MARTINS, 2004).

A Norma ASTM E837 apresenta o procedimento para determinação pelo método do furo cego, das tensões residuais próximas a superfície de um material isotrópico em condições de tensão linear elástica. O método descrito aplica-se aos casos em que as tensões não variam significativamente com a espessura (ASTM-E837, 2013).

Neste método as medidas de deformações residuais são obtidas com o emprego de um ERE radial em forma de roseta, como mostra a Figura 6 em que as tensões residuais podem ser calculadas através de equações:

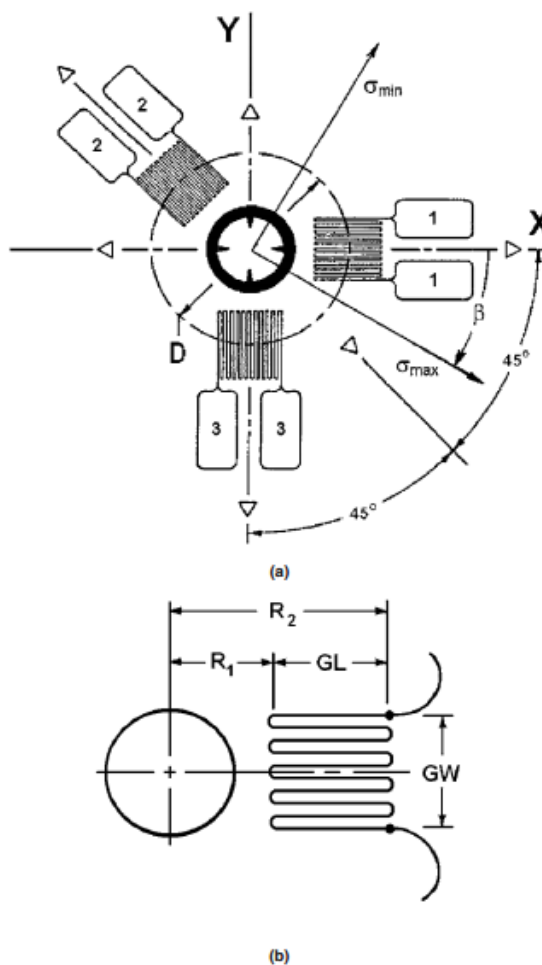


Figura 6: Geometria esquemática de uma roseta típica para método do furo cego com três elementos no sentido horário, a) Configuração da roseta, b) Detalhe do ERE. (ASTM E837)

2.2.2. Limitações do ensaio

Estudos propõem certa atenção para alguns pontos na análise de tensões residuais pelo método do furo cego. Alguns pontos são importantes para não alterar o resultado do ensaio (GRANT, LORD e WHITEHEAD, 2002).

Espaçamento entre furos

Na norma do método não é recomendado nenhuma relação de distância mínima entre furos adjacentes, mas a literatura indica uma solução de tensões nos orifícios indicando um pequeno efeito de interação entre furos serão esperados por seis ou mais diâmetros de distância. Outros estudos estabeleceram que a variação

de tensão fosse menor do que 1% quando os furos forem separados por 5,7 vezes o diâmetro (GRANT, LORD e WHITEHEAD, 2002).

É recomendado que a distância mínima entre furos fosse de no mínimo seis vezes o diâmetro do furo. Quando possível, os extensômetros devem estar localizados distantes dos furos adjacentes (GRANT, LORD e WHITEHEAD, 2002)

Dureza

O ensaio de tensões residuais pelo método do furo cego não abrange a todos os materiais, uma das propriedades do material a ser levado em consideração é a dureza do componente. Estudos propõe a utilização de brocas diamantadas quando o valor da dureza é elevado, porém os resultados podem ser prejudicados.

O ensaio pelo método do furo cego é sugerido para medir as tensões residuais em amostras com elevada dureza e elevada resistência. No entanto, o desgaste da ferramenta irá provocar o aumento ainda mais a tensão induzida e, por conseguinte, fazer com que ocorram erros de medição significativos. Embora o método do furo cego tenha vantagens quando usados para medir a tensão residual em amostras com elevada dureza e elevada resistência, um desgaste severo na broca ocorrerá (ROSSINI, DASSISTI, *et al.*, 2012).

Espessura da peça

A Norma ASTM E837-08 apresenta que é possível calcular as tensões residuais em amostras com um campo homogêneo de tensões através da espessura e também para tensões não uniformes através da espessura.

Os coeficientes de calibração podem variar com a espessura da amostra plana, de modo que a precisão da análise da tensão residual pode ser melhorada se os coeficientes de calibração são escolhidos adequadamente para corresponder à espessura do componente (SOBOLEVSKI, 2007).

2.2.3. Tratamento Matemático

Na análise das tensões residuais pelo método do furo cego se torna necessário a escolha do modelo matemático que será utilizado para tratamento dos dados obtidos pelo ensaio. Este tratamento consiste em utilizar os dados de ensaio, no caso as deformações obtidas nas três direções do extensômetro de resistência elétrica, transformando-os em resultados de tensões máximas e mínimas principais.

Na Norma ASTM E837 é apresentado um modelo de cálculo para o método do furo cego onde as tensões são uniformes no material (ASTM-E837, 2013).

As tensões residuais originalmente existentes no local do furo são avaliadas a partir das deformações aliviadas pela perfuração utilizando relações matemáticas baseadas na teoria da elasticidade linear. As deformações aliviadas dependem das tensões residuais que existiam no material originalmente dentro do furo. Para o caso de tensão uniforme, o alívio da tensão da superfície medida após a perfuração é:

$$\varepsilon = \frac{1 + \nu}{E} \bar{a} \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{E} \bar{b} \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{E} \bar{b} \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (3)$$

As constantes de calibração \bar{a} e \bar{b} indicam as deformações aliviadas devido às unidades de tensão dentro da profundidade do furo. Elas são adimensionais, quase constantes independentes do material. Valores numéricos destas constantes de calibração foram determinados por cálculos de elemento finito para roseta padrão, e estão tabelados neste método de ensaio.

Para o caso de tensão não uniforme mostrado na Norma, o alívio da tensão superficial medida após concluir a profundidade do furo da etapa j depende das tensões residuais que existiam no material originalmente em todas as etapas de profundidade do furo $1 \leq k \leq j$:

$$\varepsilon_j = \frac{1 + \nu}{E} \sum_{k=1}^j \bar{a}_{jk} \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)_k + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)_k \cos 2\theta + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} (\tau_{xy})_k \sin 2\theta \quad (4)$$

As constantes de calibração \bar{a}_{jk} e \bar{b}_{jk} indicam as deformações aliviadas na etapa de profundidade j do furo, devido às tensões da unidade dentro da etapa k do furo. A Figura 7 mostra desenho esquemático de cortes transversais de perfuração.

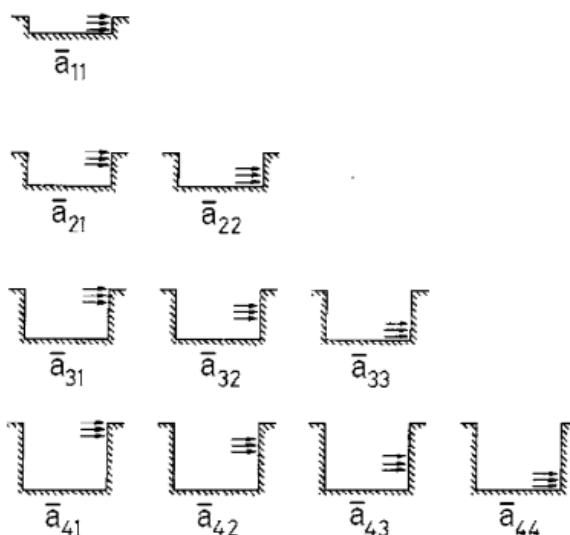


Figura 7: Interpretação física dos coeficientes \bar{a}_{jk} (Adaptada de (ASTM-E837, 2013)).

O cálculo das tensões residuais uniformes pode ser realizado segundo os procedimentos indicados pela norma ASTM E837 ou pela TN-503-04. Para o cálculo das tensões residuais não uniformes, outros métodos foram desenvolvidos, sendo os principais: o Método da Integral, o Método das Séries de Potências e o Método de Kockelmann, descritos a seguir.

Método da Integral

Identifica a contribuição individual das tensões a cada incremento de profundidade do furo, a partir da leitura dos valores acumulados das deformações (SOARES, 1998).

O princípio básico deste método é que uma distribuição de tensões residuais arbitrária pode ser decomposta em componentes de tensão equibiaxial e cisalhante. Schajer mostrou que a relação entre as tensões residuais originais e a deformação radial aliviada pode ser escrita da forma indicada na equação (5).

$$\varepsilon_r(Z) = \frac{1+\nu}{2E} \int_0^Z a(Z, h) \sigma_{eq}(Z) dZ + \frac{1}{2E} \int_0^Z b(Z, h) \sigma_c(Z) \cos(2\beta(Z)) dZ \quad (5)$$

Onde:

$\sigma_{eqb}(Z) = \sigma_{max}(Z) + \sigma_{min}(Z)$ é a componente de tensão equibiaxial e,

$\sigma_{cS}(Z) = \sigma_{max}(Z) - \sigma_{min}(Z)$ é a componente de tensão cisalhante.

A função $a(Z, h)$ é decorrente da resposta à deformação radial no ERE correspondente a tensão equibiaxial unitária atuando na profundidade Z de um furo de profundidade h . Similarmente, $b(Z, h)$ é a deformação radial em $\beta = 0$ correspondente à tensão unitária puramente cisalhante, agindo na profundidade Z de um furo de profundidade final h . Estes são valores adimensionais derivados das constantes A e B. Como o ângulo β é medido no sentido anti-horário a partir da direção de σ_{max} , a qual β depende de Z (MARTINS, 2004).

O Método da Integral considera que as tensões residuais variam linearmente no interior de cada incremento. As constantes de calibração desenvolvidas para este método foram calculadas por elementos finitos, simulando um estado de tensões residuais não uniformes. Este é um método extremamente sensível aos erros de alinhamento e medida das deformações e é indicado para o cálculo das tensões residuais não uniformes que apresentam grande variação com a profundidade.

Método das Séries de Potências

O método das Séries de Potências aproxima a distribuição de tensões a um polinômio, este é o método que descreve melhor as tensões que podem ser representadas por um polinômio (SCHAJER, 2013).

O método das séries de potencias foi introduzido por Schajer como um valor aproximado, mas um método teoricamente aceitável para calcular campos de tensões não uniformes. Neste método, o campo de tensões residuais é dividido em séries polinomiais de potência, tais como mostra a equação (6):

$$\sigma_{TR}(Z) = P_0 + P_1Z + P_2Z^2 + P_3Z^3 + \dots + P_nZ^n \quad (6)$$

Onde, Z é a distância da superfície até o incremento em questão. Infelizmente, o método só fornece resultados confiáveis quando se utilizam apenas os dois primeiros termos da série. Sendo que primeiro termo representa a distribuição de tensões residuais uniforme e o segundo a distribuição de tensões residuais variando linearmente com a profundidade a partir da superfície. As constantes de calibração também são calculadas por elementos finitos. As vantagens deste método são: a menor sensibilidade aos erros de medida das deformações e a possibilidade de se extrapolar os resultados para profundidades maiores (aproximadamente iguais ao diâmetro do furo).

$$\sigma_{TR}(Z) = P_0 + P_1Z \quad (7)$$

Uma vantagem do Método das Séries de Potências é que o procedimento de mínimos quadrados forma um melhor ajuste de curva através dos dados de deformação medidos. Este efeito médio é particularmente eficaz quando as medições de deformação são feitas em muitos incrementos de profundidade. Uma limitação deste método é que ele é adequado somente para campos de tensão que varia suavemente.

Método de Kockelmann

O Método de Kockelmann foi apresentado em 1993, como uma opção para o cálculo das tensões residuais não uniformes, que apresentam grande variação com a profundidade, utilizando dados experimentais de calibração (SCHWARZ e KOCKELMANN, 1993).

A relação da deformação para o conhecimento do estado de tensão é encontrada utilizando os principais parâmetros significativos da técnica (principalmente extensômetro de resistência elétrica e parâmetros geométricos do método do furo cego).

A medida de calibração ou computação somente precisa ser realizada uma vez, as deformações e o carregamento na direção (ε_x) e na direção perpendicular

(ε_y) são gravados para cada estágio de profundidade. Destes resultados as funções de calibração $K_x(\xi)$ e $K_y(\xi)$ são calculadas como se segue no âmbito das considerações das constantes elásticas para o material e para a carga uniaxial σ (SCHWARZ e KOCKELMANN, 1993):

$$K_x(\xi) = \frac{E}{\sigma} \frac{d\varepsilon_x(\xi)}{d\xi} \quad (8)$$

e,

$$K_y(\xi) = -\frac{E}{\nu\sigma} \frac{d\varepsilon_y(\xi)}{d\xi} \quad (9)$$

Nestas equações (8) e (9), E é o Módulo de Young, ν é o coeficiente de Poisson e ξ é a relação da profundidade do furo z , referente ao diâmetro do furo D_0 (profundidade normalizada): $\xi = \frac{z}{D_0}$.

Na realização da calibração para o método do furo cego utilizando o método de Kockelmann para o cálculo das tensões, o diâmetro do furo d_0 é usinado de modo incremental submetido na amostra para se conhecer o estado de tensão externa com calibração das tensões $\sigma_{c,x}(\xi)$ e $\sigma_{c,y}(\xi)$. A calibração das tensões por este método pode ser aplicado pelo modo experimental ou numérico. As deformações relaxadas na calibração $\varepsilon_{c,x}(\xi)$ e $\varepsilon_{c,y}(\xi)$ são diferenciadas em ordem para calcular as funções de calibração $K_x(\xi)$ e $K_y(\xi)$. Observe que no caso da calibração, são utilizados somente dois ERE, os quais são posicionados nas duas direções principais de tensões de calibração como é apresentado na Figura 8. A calibração é independente do material, isto é, os parâmetros E e ν da amostra ou modelo de calibração não são necessariamente iguais ao material do componente medido (SOBOLEVSKI, 2007).

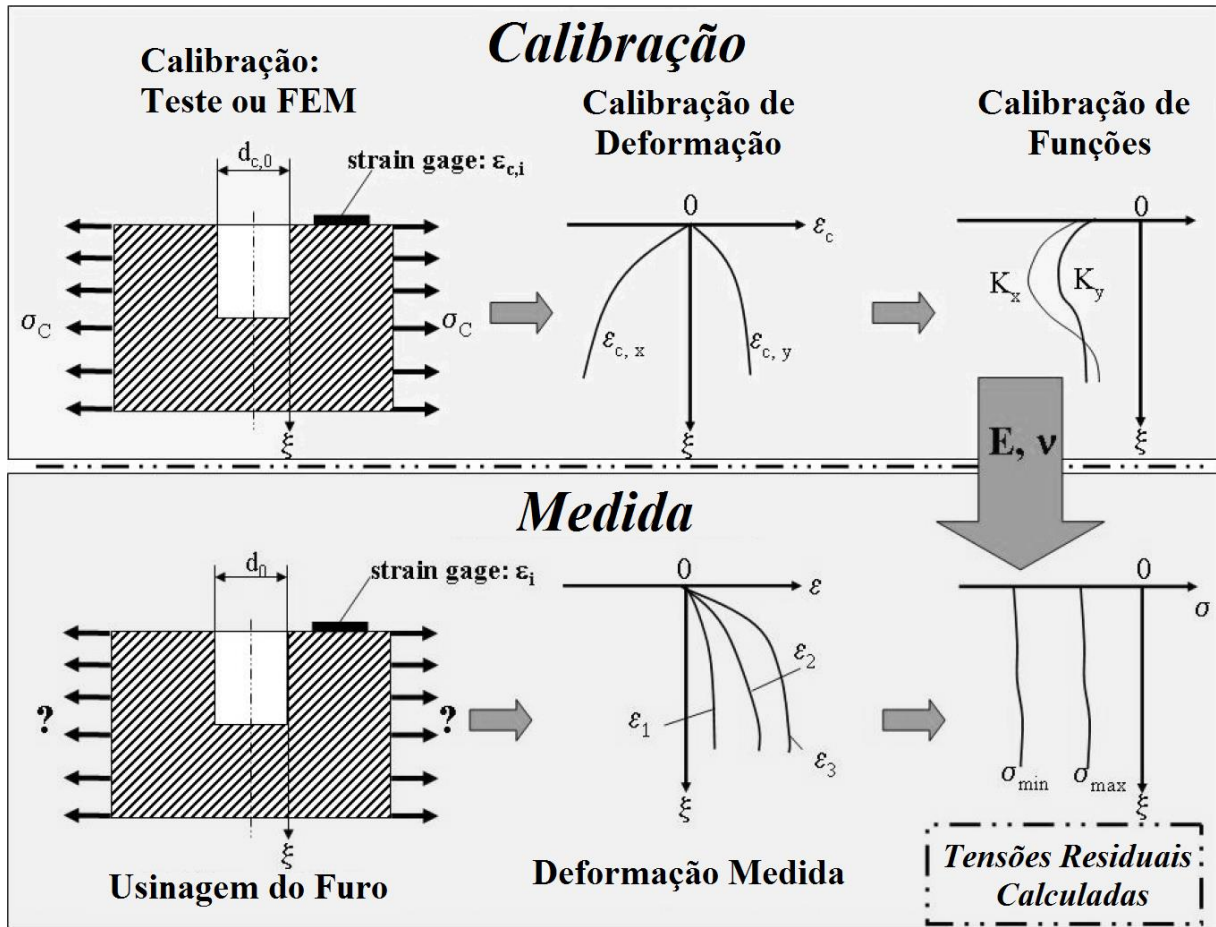


Figura 8: Método de Kockelmann: Relação entre Calibração e Cálculo das tensões (Adaptada de (SOBOLEVSKI, 2007)).

Após a medição no componente as deformações registradas são convertidas em tensões residuais, utilizando as funções de calibração a seguir.

$$\sigma_a(\xi) = \frac{E}{(K_X(\xi))^2 - \nu^2(K_Y(\xi))^2} \left[K_X(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_Y(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right] \quad (10)$$

$$\sigma_b(\xi) = \frac{E}{(K_X(\xi))^2 - \nu^2(K_Y(\xi))^2} \left[K_X(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_Y(\xi) \left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \frac{d\varepsilon_b(\xi)}{d\xi} - \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \right] \quad (11)$$

$$\sigma_c(\xi) = \frac{E}{(K_X(\xi))^2 - \nu^2(K_Y(\xi))^2} \left[K_X(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} + \nu K_Y(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right] \quad (12)$$

Através da relação estipulada pelo Circulo de Mohr de tensões, as tensões máxima e mínima principais, σ_{max} e σ_{min} podem ser obtidas, assim como o ângulo principal. Os resultados estão representados na equação (13), respectivamente:

$$\sigma_{max}(\xi) / \sigma_{min}(\xi) = \frac{\sigma_a(\xi) + \sigma_b(\xi)}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_a(\xi) - \sigma_b(\xi))^2 + (\sigma_c(\xi) - \sigma_b(\xi))^2} \quad (13)$$

Para tensões residuais homogêneas e gradientes lineares de tensões residuais os três métodos concordam muito bem. Com mudanças do tipo degraus no estado de tensões residuais todos os métodos nivelam o efeito para alguma extensão. Esta é a desvantagem que não pode, em principio, ser completamente evitada utilizando incrementos muito pequenos de profundidade. Deve-se finalmente apontar que todos os métodos são estudados com a utilização de materiais homogêneos e isotrópicos.

2.3. Incerteza de medição

O objetivo na obtenção da incerteza de medição se dá em obter a variação nos resultados das medições. Segundo o Guia da Incerteza de Medição, a definição do termo “incerteza de medição” é relatada como um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (JCGM, 2008) e (INMETRO e ABNT, 2003).

A incerteza está relacionada a um valor de medição, que é o resultado da medição, e não ao valor verdadeiro do mensurando, o qual na prática não é conhecido. O resultado da medição é apenas a melhor estimativa de tal valor verdadeiro e, na ausência de efeitos sistemáticos, geralmente é obtido pela média aritmética de N medições repetidas do mesmo mensurando.

Outro ponto é que a incerteza caracteriza uma faixa de dispersão ou intervalo, e não um valor pontual. Nesse sentido, a incerteza não deve ser confundida com “erro”, pois esse último é um valor pontual e não uma faixa e usualmente pode ser corrigido, quando aplicado um fator de correção adequado. Já a incerteza é a dúvida remanescente associada ao resultado da medição, ela mede o grau de desconhecimento sobre aquilo que está sendo medido (INMETRO, 2008).

A utilização do cálculo da incerteza de medição vem sendo crescente nos laboratório de ensaios, sendo universitários ou comerciais. O interesse por obter este valor é a acreditação por um órgão responsável pela certificação dos ensaios, com isso o laboratório passa a ter credibilidade. Para tanto é necessário o desenvolvimento de procedimentos internos que facilitam a repetição de ensaios. A viabilidade dos métodos de ensaio depende muito do domínio dos modos de medição, assim é possível aumentar o volume de testes, bem como aumentar a qualidade dos testes realizados (LEGENDRE, 2000).

É comum o emprego de ferramentas da qualidade para obter um método de cálculo da incerteza de medição. Uma das ferramentas mais utilizadas é o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como “Diagrama de Causa e Efeito” ou “Diagrama Espinha de Peixe”. A partir da montagem do diagrama de Ishikawa é possível determinar as causas do problema.

O diagrama de causa e efeito apresenta visualmente e graficamente as causas potenciais dos problemas ocorridos e seus efeitos que impactam diretamente na qualidade do que é produzido. Além disto, o diagrama de causa e efeito é uma ferramenta que contribui para o aperfeiçoamento do processo, reunindo a equipe e promovendo uma bateria de discussões em torno dela (CITISYSTEMS, 2012).

2.3.1. Causas e tratamento de incertezas

Ao realizar uma medição, muitas podem ser as variáveis que dispersam os resultados. As falhas de medição podem ser visíveis ou invisíveis durante a operação. As condições para a realização do ensaio dificilmente estarão em perfeitas condições, algumas causas de incertezas são citadas a seguir (BELL, 1999):

- Instrumentos de medição: os instrumentos podem sofrer avarias que acarretam erros, alterações devido o envelhecimento do equipamento, desgaste ou outros tipos de desvio.
- Item sofrendo alterações: o qual pode não ser estável, (como medir o tamanho de um cubo de gelo em uma sala quente).
- Processo de medição: a medida pode ser difícil de ser realizada. Como medir algo em movimento, as dificuldades requerem um processo para minimizar as dificuldades na operação.
- Incertezas 'importadas': a calibração de seu instrumento tem uma incerteza a qual é constituída pela incerteza das medições feitas. No entanto, a não calibração de um equipamento acarreta um erro ainda maior.
- Erro do operador - algumas medições dependem da habilidade e julgamento do operador. Trabalhos delicados de uma medição podem ser realizados de uma maneira mais eficiente por um operador do que por outro. A utilização de instrumentos que dependem do tempo de reação do operador mostram a diferença entre operadores. Erros grosseiros são tratados de maneira diferente, pois não se trata de incertezas.

A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns desses componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais. Outros componentes, que também podem ser caracterizados por desvios padrão, são avaliados por meio de distribuições de probabilidade assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações. Em geral, o resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é somente uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando e, assim, só é completa quando acompanhada pela declaração da incerteza dessa estimativa (PIZZOLATO, 2006).

O tratamento dado às grandezas de entrada possibilita chegar a um valor para a estimativa da incerteza de medição. Conforme mostrado na Figura 9, o método de estimativa da incerteza de medição pode ser subdividido em quatro grandes etapas (PIZZOLATO, 2006):

1 – Definição das grandezas de entrada;

- 2 – Determinação dos coeficientes de sensibilidade;
- 3 – Cálculo da incerteza padrão combinada;
- 4 – Cálculo da incerteza expandida.

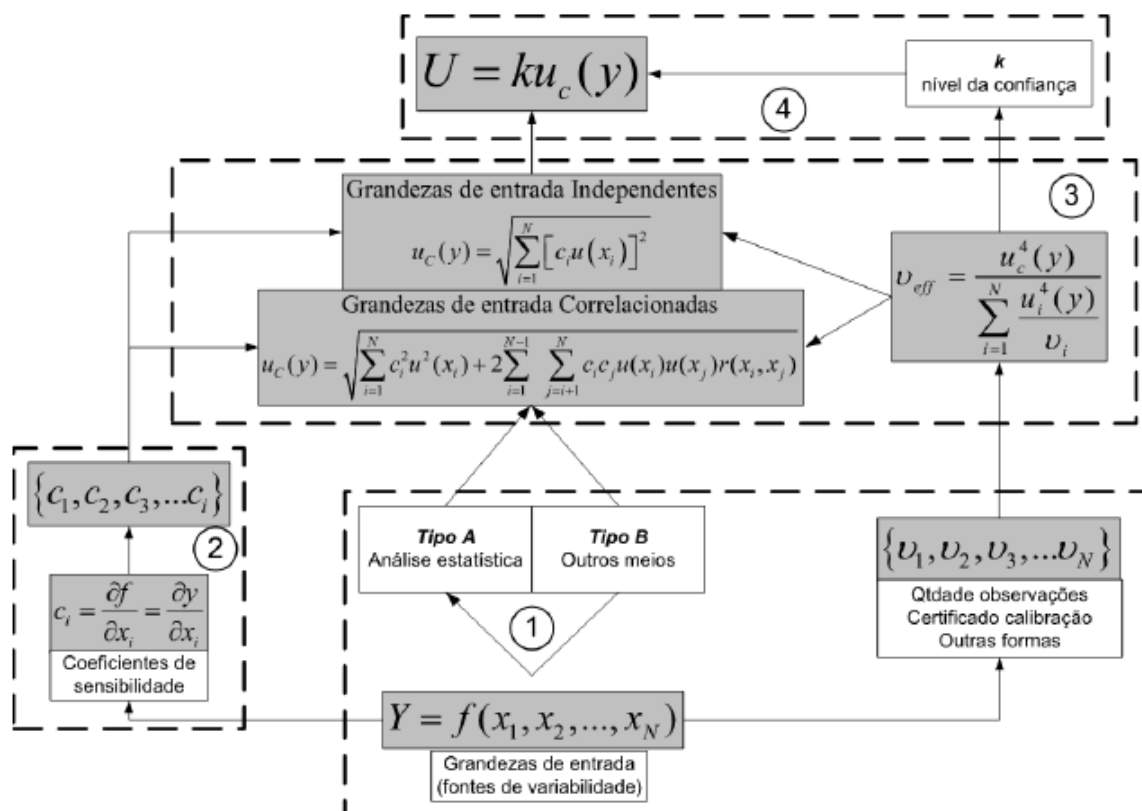


Figura 9: Diagrama do método de estimativa da incerteza de medição (Adaptado de (PIZZOLATO, 2006)).

Etapa 1: Definir as grandezas de entrada (x_1, x_2, \dots, x_N) a considerar para que se obtenha a estimativa da incerteza de medição, determinando a forma como elas se relacionam, ou seja, o modelo matemático que rege a variabilidade do processo de medição que está sendo realizado. Para cada grandeza determina-se a distribuição de probabilidade que representa seu comportamento, bem como, seus respectivos graus de liberdade ($v_1, v_2, v_3, \dots, v_n$). Levar em consideração que as grandezas de entrada podem ser estimadas com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições (caracterizados por um desvio padrão experimental – tipo A)

e, ainda, outros componentes, que podem ser caracterizados por desvios padrão (tipo B), mas avaliados por meio de distribuições de probabilidade assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações. É nesta etapa que se verifica o relacionamento das grandezas de entrada, ou seja, se elas são independentes ou correlacionadas. A combinação dessas grandezas, realizada na etapa 3, é diferente de acordo com o tipo de relacionamento existente entre elas.

Etapa 2: Determinar o coeficiente de sensibilidade (c_1, \dots, c_i) que descreve como a estimativa de saída y varia com as alterações nos valores das estimativas de entrada (x_1, x_2, \dots, x_N). Nesta etapa também se pode verificar quanto cada fonte contribui para a incerteza global do ensaio ou calibração.

Etapa 3: Calcular a incerteza padrão combinada (u_c), que é a incerteza do ensaio ou da calibração, considerando todas as fontes de incerteza, como um desvio padrão. Deve-se observar o relacionamento das grandezas de entrada, pois a combinação das incertezas padrão (o desvio padrão combinado) é realizada distintamente, dependendo do caso. A incerteza padrão combinada é uma combinação de diferentes distribuições de probabilidade das grandezas de entrada (desde que elas sejam independentes), fundamentada no teorema do limite central, desse modo, se faz necessário calcular seus graus efetivos de liberdade (v_{eff}).

Etapa 4: Calcular a incerteza expandida (U), que é a incerteza do ensaio ou calibração, considerando todas as grandezas de entrada com desvio padrão relevante para obter-se um maior nível da confiança naquela estimativa.

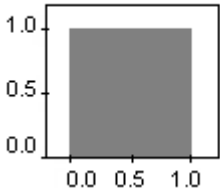

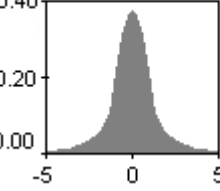
2.3.2. Tipo de Fonte de Incerteza

As fontes de incerteza podem ser divididas em dois tipos: A e B (JCGM, 2008) e (BELL, 1999).

- Incertezas do tipo A são provenientes de observações repetidas, nesse caso o valor da incerteza (u) pode ser estimado como o desvio padrão (s) dividido pela raiz do número de observações realizadas.
- Incertezas do tipo B são aquelas avaliadas pelo julgamento, conhecimento prévio dos equipamentos, certificados, manuais, etc. Os casos mais comuns

deste tipo de incerteza são listados na Figura 10, sendo “a” um valor estimado/parâmetro das distribuições. A distribuição uniforme geralmente é usada quando se conhecem os valores máximo e mínimo de erro de uma medida e não se tem informação alguma sobre sua distribuição. A distribuição triangular é usada quando se conhecem os valores máximo e mínimo e também é conhecido o valor mais provável.

A distribuição de probabilidade para cada variável depende do tipo de informação que se tem disponível a respeito da respectiva componente de incerteza. A Figura 10 fornece orientações à atribuição de distribuições de probabilidade, assim como o seu divisor apropriado.

Tipo de Componente de Incerteza	Distribuição de Probabilidade	Divisor
Quando se conhecem apenas os valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$): por exemplo, o erro máximo admissível para um determinado equipamento ou o efeito causado pela resolução finita do equipamento utilizado.	Retangular 	$\sqrt{3}$
Quando se conhecem os valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$) e o valor mais provável: por exemplo, o erro de posicionamento de um instrumento em uma marca de escala.	Triangular 	$\sqrt{6}$
Desvio padrão da média de um conjunto de N medições repetidas.	t-Student 	\sqrt{N}
Desvio padrão de dados históricos de repetitividade e/ou reprodutibilidade, na situação em que o resultado do ensaio/calibração é obtido por meio de	t-Student	1

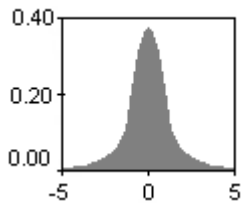
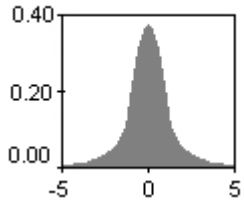
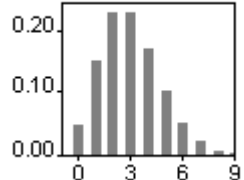
uma única medição e não por uma média.		
Incerteza herdada da calibração de equipamentos e padrões	<p data-bbox="890 483 1174 600">Normal ou t-Student, conforme certificado de calibração.</p> 	Valor de k informado no certificado de calibração
Desvio padrão de um processo de contagem de elementos discretos, com média m e desvio padrão \sqrt{m} .	<p data-bbox="986 875 1086 898">Poisson</p> 	1

Figura 10: Resumo das distribuições de probabilidade (Adaptado de (RS, 2009)).

DISTRIBUIÇÃO T-STUDENT

A distribuição t-Student é comumente usada quando se pretende fazer um teste de hipótese o qual é testado se o conjunto segue uma distribuição normal com média conhecida e variância desconhecida (INMETRO e ABNT, 2003).

Propriedades importantes na distribuição t-Student:

- ✓ A curva da distribuição t-Student tem a mesma forma em sino da distribuição Normal, mas reflete a maior variabilidade (com curvas mais alargadas) que é de se esperar em amostras pequenas.
- ✓ Quanto maior a dimensão da amostra, mais a distribuição t-Student se aproxima da distribuição Normal.

2.3.3. Roteiro para Cálculo da Incerteza de Medição

Deve-se realizar uma análise crítica a fim de identificar todas as componentes de incerteza. Tais componentes podem estar atrelados a condições ambientais, operador, equipamentos e padrões utilizados, método de medição, amostragem e outros fatores. Uma vez definidas as componentes de incerteza, deve-se verificar se todas as componentes estão devidamente representadas como grandezas de entrada no modelo matemático da medição. Em caso negativo, deve-se complementar o modelo matemático introduzindo tais grandezas na tabela de cálculo da incerteza.

As incertezas associadas às variáveis do modelo matemático da medição são avaliadas de acordo com os métodos de avaliação do GUM. O roteiro para a aplicação da incerteza de medição para determinado ensaio é apresentado na Figura 11.

Ao final, convém apresentar todos os cálculos realizados por meio de uma “planilha de incerteza”. Convém que tal planilha apresente, no mínimo, a descrição das componentes de incerteza, o valor das incertezas padrão, os coeficientes de sensibilidade, as contribuições para incerteza, a incerteza combinada, o valor do fator de abrangência k e a incerteza expandida.

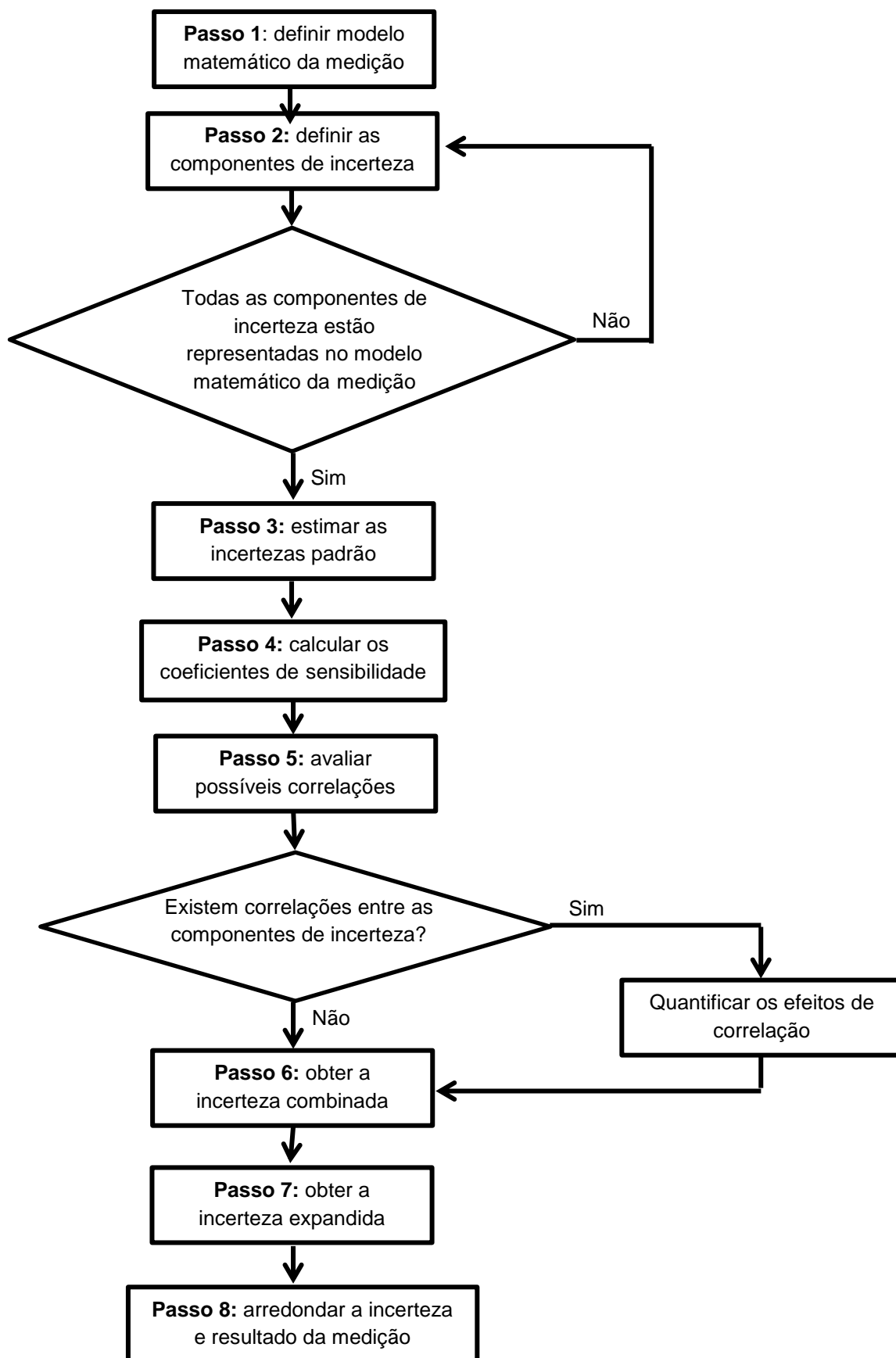


Figura 11: Fluxograma dos passos para a expressão da incerteza de medição (Adaptado de (METROLÓGICA, 2009)).

Um modelo, baseado no documento do Inmetro NIT-DICLA-021, é apresentado na Tabela 2. Este modelo serve apenas como orientação.

Tabela 2: Esquema de um arranjo organizado das grandezas, estimativas, incertezas padrão, coeficientes de sensibilidade e contribuições de incertezas utilizadas na análise de incerteza de medição (Adaptado de (METROLÓGICA, 2009)).

Variável	Descrição da Fonte de Incerteza	Estimativa da fonte de incerteza (+/-)	Distribuição de probabilidade	Divisor	Incerteza Padrão	Coefficiente de Sensibilidade	Contribuição de incerteza (+/-)	Grau de liberdade (vi)
	Atribuir graus de liberdade para as fontes de incerteza.							
u_c	Incerteza combinada		t-Student					
U	Incerteza expandida							

Diagrama de fluxo sobre a tabela:

- Arco superior com \oplus indica soma das contribuições de incerteza para obter u_c .
- Arco superior com \otimes indica multiplicação da incerteza padrão pelo coeficiente de sensibilidade para obter a contribuição de incerteza.
- Arco superior com \div indica divisão da estimativa da fonte de incerteza pelo divisor para obter a incerteza padrão.
- Arco superior com \oplus indica soma dos quadrados das contribuições de incerteza.
- Arco superior com $\sqrt{\quad}$ indica a operação de raiz quadrada aplicada à soma dos quadrados para obter u_c .
- Arco superior com \times indica multiplicação de u_c pelo fator k para obter a incerteza expandida U .
- Arco superior com \oplus indica soma dos graus de liberdade para obter V_{eff} .

A planilha proposta apresenta algumas resoluções para se chegar ao objetivo de obter a incerteza expandida. Após estimar a incerteza das fontes descritas deve-se dividir esta pelo divisor que é referente a distribuição de probabilidade designada para aquela fonte, este resultado é chamado de incerteza padrão da fonte. Esta incerteza padrão deve ser multiplicada pelo coeficiente de sensibilidade que foi conseguido através do modelo matemático, e este resultado é chamado de contribuição de incerteza. Somando todos os quadrados das contribuições de incerteza e tirando a raiz quadrada desta soma se obtém a incerteza combinada. Finalmente a incerteza combinada é multiplicada pelo k - fator de abrangência e assim chegar ao valor da incerteza expandida.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Metodologia

Essa metodologia consistiu na elaboração de um procedimento que envolve a determinação e caracterização das fontes de incerteza tanto na parte experimental como no tratamento matemático dos dados.

Neste trabalho, os ensaios foram conduzidos de modo que os resultados finais apresentam os perfis de tensões residuais para 12 incrementos de profundidade variando entre 80 a 800 μm . As incertezas de medição foram determinadas primeiramente para cada um desses incrementos e posteriormente foi calculada a incerteza global do ensaio. Para facilitar a determinação das incertezas de medição foram criadas planilhas de cálculo utilizando-se o software Microsoft Excel. Essas planilhas foram verificadas e validadas a partir da comparação com cálculos realizados manualmente. No final do trabalho, no Apêndice A, é apresentado um caso prático da utilização das planilhas de cálculo para a determinação da incerteza de medição.

O tratamento matemático dos dados do ensaio utilizado para o cálculo das tensões residuais foi o método de Kockelmann. Esta escolha se justifica por ser este o método empregado no LAMEF, tendo em vista que um dos objetivos específicos desse trabalho é contribuir para a acreditação desse ensaio que o LAMEF busca junto ao INMETRO. Além disso, trata-se de um método largamente difundido e aceito na comunidade científica e que permite a determinação de tensões residuais não uniformes mesmo com grande variação com a profundidade.

Os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson do material da amostra devem ser conhecidos para o cálculo das tensões residuais. Esses valores foram determinados experimentalmente através de ensaio de tração instrumentado com extensômetros de resistência elétrica.

A metodologia utilizada é apresentada em forma de diagrama de blocos na Figura 12. Neste diagrama é possível ter uma visão geral das etapas que compreendem a parte experimental deste trabalho. Cada uma destas etapas é apresentada detalhadamente a seguir.

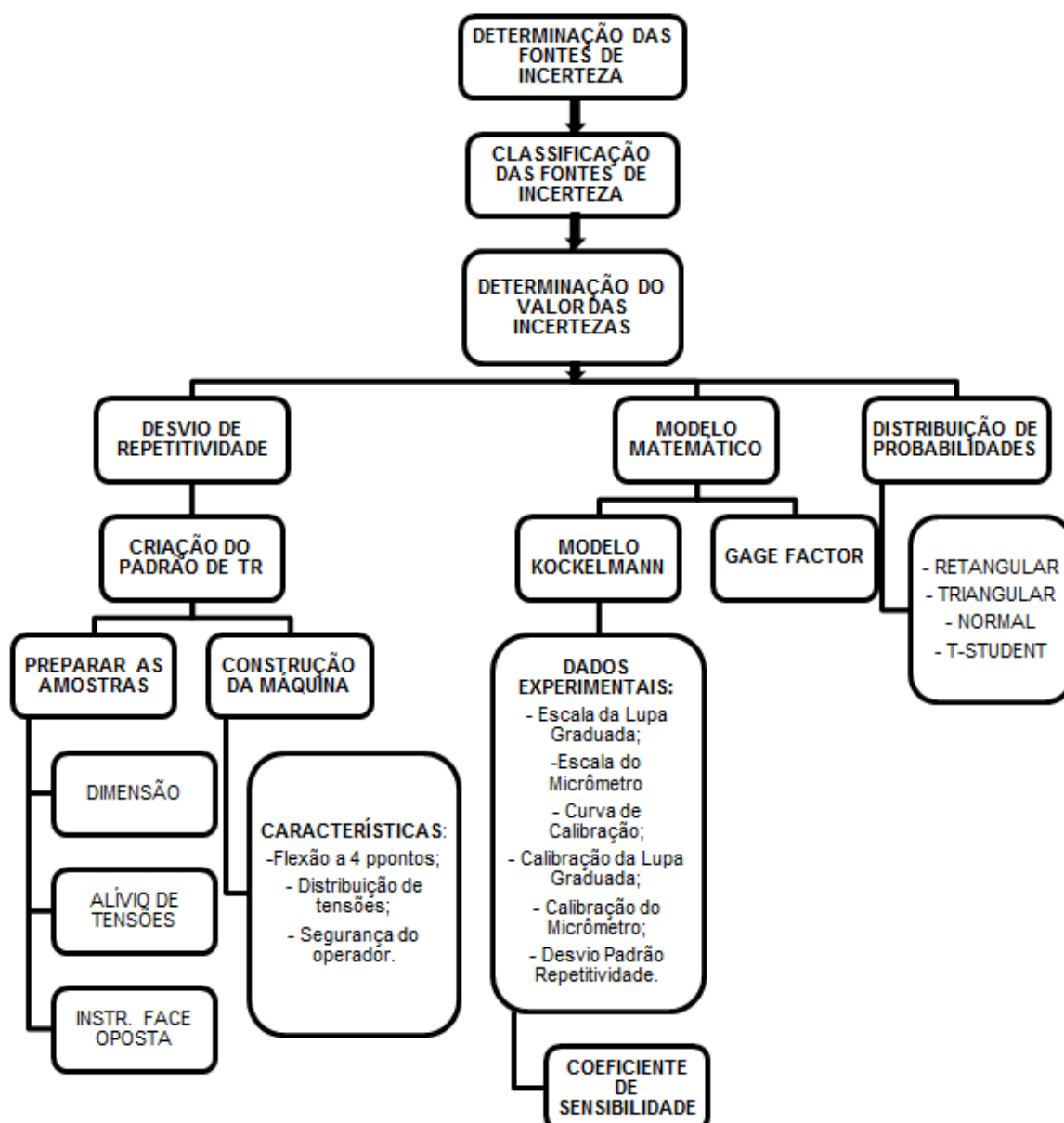


Figura 12: Fluxograma que apresenta esquematicamente a metodologia seguida neste trabalho.

3.1.1. Determinação e classificação das fontes de incerteza

Para o cálculo da incerteza de medição do ensaio, o primeiro passo foi a determinação das fontes de incerteza. Primeiramente, um Diagrama de Ishikawa foi elaborado no intuito de estabelecer os pontos considerados importantes para a realização do ensaio para medição de tensões residuais pelo método do furo cego. A partir do momento em que se obtêm todas as fontes de incerteza expostas, o propósito da análise consiste em classificá-las. A classificação das fontes de

incerteza foi determinante para o cálculo da incerteza, a partir desta classificação se determinou a distribuição de probabilidade de cada variável.

O método de avaliação da incerteza de medição, segundo o Guia para Expressão da Incerteza de Medição - GUM deve ser proposto a partir da análise das variáveis que possam ter efeito no ensaio. Seguindo a orientação do guia, a análise da incerteza de medição foi calculada a partir de um modelo matemático que representa as grandezas de entrada do ensaio. Os modelos matemáticos utilizados para esta análise são referentes ao método de Kockelmann, que atende a análise de tensões residuais pelo método do furo cego. Estes modelos matemáticos representam as três direções da roseta (a , b e c), os cálculos referentes ao modelo matemático são realizados para cada variável e nas três direções. A principal dificuldade na determinação da incerteza de medição pelo método do furo cego, conforme o levantamento das variáveis do ensaio é a determinação do erro do operador. Observando as possíveis grandezas de entrada verificou-se que o método é sensível ao operador do ensaio, sendo necessário o cálculo do desvio padrão da repetitividade do ensaio.

3.1.2. Determinação do desvio de repetitividade

O método do furo cego, por se tratar de um ensaio semi-destrutivo, não permite a repetição da medição, o que torna fundamental uma análise preliminar sobre como reproduzir os ensaios com repetitividade confiável. Para tanto, foi necessário gerar um corpo de prova com uma distribuição homogênea de tensão. Maiores detalhes sobre os conceitos e procedimentos para obtenção dessa amostra padrão são dados no subitem 3.2. Porém, de um modo geral, a obtenção da amostra consistiu na aplicação de um carregamento em flexão a quatro pontos em uma viga retangular a qual foi submetida anteriormente a tratamento térmico para alívio de tensões residuais.

3.2. Determinação do Erro do Operador

Devido ao grau de complexidade do ensaio, um dos pontos críticos no estudo da incerteza de medição é a determinação da incerteza devido ao operador. A impossibilidade de repetição do ensaio para um mesmo ponto tem como

consequência a necessidade de uma verificação paralela. Esta verificação requer a criação de uma amostra padrão com tensões residuais homogêneas em uma região de tamanho suficientemente grande para permitir a realização de medições em vários pontos.

O procedimento consistiu na aplicação de um carregamento em flexão a quatro pontos em uma amostra do tipo viga retangular previamente tratada termicamente para alívio de tensões. A verificação da homogeneidade das tensões presentes na amostra foi realizada empregando-se primeiramente medição de tensões residuais com difração de raios-X. No momento do ensaio pelo MFC foi utilizado monitoramento das tensões aplicadas através de extensometria de resistência elétrica. As etapas para a determinação do erro do operador foram:

1. Determinação do tipo de carregamento;
2. Determinação da geometria e dimensões das amostras;
3. Usinagem das amostras;
4. Tratamento térmico das amostras para alívio de tensões;
5. Verificação das tensões residuais por difração de raios-X;
6. Projeto e construção de uma máquina para aplicação do carregamento;
7. Instrumentação das amostras para monitoramento da tensão aplicada;
8. Aplicação do carregamento;
9. Realização dos ensaios com o método do furo cego com diferentes operadores;
10. Determinação da incerteza de medição devido ao operador.

3.2.1. Conceitos para o desenvolvimento da amostra

A solução adotada para a obtenção de uma região homogênea foi submeter uma amostra a um estado de tensão dentro do regime elástico aplicando um carregamento externo, o qual foi mantido constante durante a realização dos ensaios. Este carregamento externo impôs uma tensão ao material. Não se trata de tensão residual, mas sim de tensão aplicada a partir de um carregamento externo. Contudo, esse procedimento pode atender satisfatoriamente as necessidades desse trabalho, desde que sejam tomadas algumas precauções. Dentre essas precauções,

está a dimensão da amostra, a qual deve possuir tamanho suficientemente grande comparado ao volume de material removido na usinagem do furo. De acordo com o princípio de Saint Venant, a remoção de material na usinagem do furo não interfere na distribuição de tensão a distâncias consideráveis, gerando apenas uma redistribuição localizada de tensões nas proximidades do furo. Além disso, as amostras devem possuir um estado homogêneo de tensões residuais. Nesse trabalho a homogeneidade foi conseguida através de tratamento térmico para alívio de tensão, a homogeneidade das tensões após o tratamento térmico foi verificada através de medições com a técnica de difração de raios-X.

Para este trabalho foram preparadas 3 amostras, as quais foram submetidas a tratamento térmico para obtenção de alívio e homogeneidade das tensões residuais. Em cada amostra foram realizadas medições de tensões residuais pelo método do furo cego em 4 pontos, 2 pontos por operador. As medições de tensões residuais foram realizadas em uma das faces de cada amostra, identificada como lado A. A face oposta (lado B) foi instrumentada com extensômetros de resistência elétrica do tipo roseta, idênticos aos utilizados no método do furo cego para o monitoramento das tensões. Este foi um ponto importante para o controle da tensão aplicada. A Figura 13 apresenta o posicionamento dos extensômetros de resistência elétrica utilizados para o monitoramento das tensões no lado B.



Figura 13: Posicionamento dos ERE no monitoramento das tensões na face oposta.

As etapas de manufatura da amostra e da construção da máquina foram realizadas simultaneamente. A seguir são apresentados os detalhes a respeito da obtenção da amostra e sobre o projeto da máquina.

3.2.2. Projeto da amostra para aplicação do carregamento

Uma série de cuidados foi tomada durante a concepção e o projeto da amostra para garantir a confiabilidade da análise. Dentre estes, foi indispensável o estudo do material adequado para o corpo de prova, bem como suas dimensões. Para tanto, foram levados em consideração alguns pontos da norma ASTM E-837 e do manual de operação do equipamento como, distância mínima entre pontos de medição, espessura mínima da amostra, tensão limite de escoamento e dureza do material da amostra.

Como amostra padrão foi utilizada uma viga de seção retangular submetida à solicitação de flexão a quatro pontos. Essa configuração permite a geração de um estado de tensão homogêneo em toda a região central da amostra compreendida entre os dois pinos de apoio centrais, conforme diagramas de esforço cortante e de momento fletor apresentado na Figura 14. Além disso, essa configuração permite a aplicação do carregamento de maneira segura, estável e sem necessidade de construção de uma máquina de grandes dimensões.

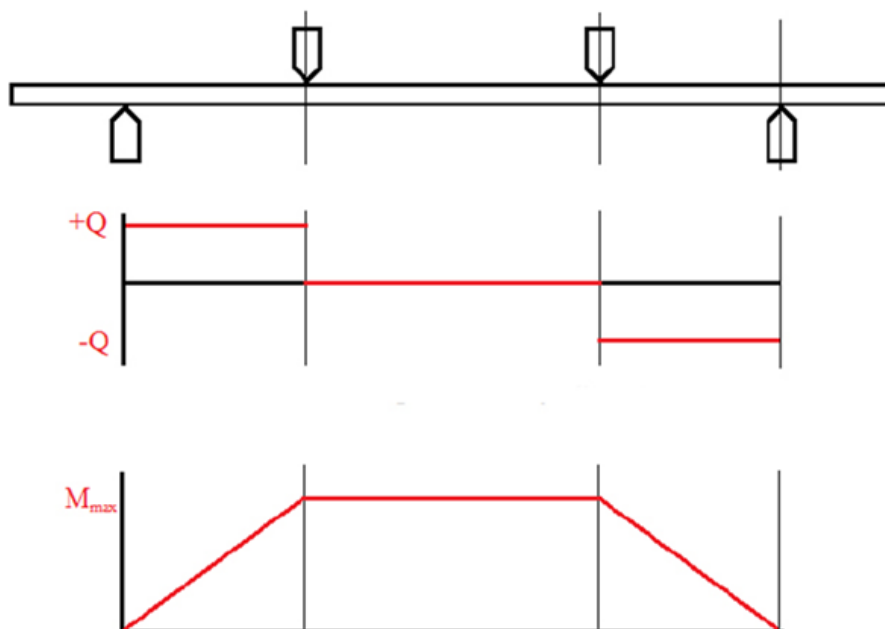


Figura 14: Diagrama de esforços cortantes (Q) e momento fletor (M) para o caso de uma viga submetida a solicitação de flexão a quatro pontos.

Material

O material selecionado para a amostra foi o aço AISI 4140. Esse material foi selecionado por apresentar propriedades mecânicas que atendem as necessidades de projeto: 1) tensão limite de escoamento elevado o suficiente para que uma amplitude de carregamento da ordem de 300MPa não represente mais do que 50% da tensão limite de escoamento; 2) Dureza não muito elevada (máximo de 38HRC), a fim de evitar esforços muito grandes entre a ferramenta e a amostra durante a usinagem do furo. Esses dois pontos supracitados devem ser observados pois é sabido que há redução na confiabilidade dos resultados do método do furo cego quando estes não são atendidos.

Tratamento térmico

Após a usinagem da amostra, com eletroerosão a fio, a mesma foi submetida a tratamento térmico para alívio de tensões residuais, 1 hora a 600°C em forno com atmosfera controlada de Nitrogênio, seguido de resfriamento controlado no forno. Esse mesmo tratamento térmico foi aplicado a três corpos de prova de ensaio de tração para determinar o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

Dimensões

O estudo para determinação das dimensões da amostra levou em consideração o diâmetro do furo usinado durante o ensaio (em torno de 1,8 mm), a distância mínima entre furos (igual a 6 vezes o diâmetro do furo) e o número de pontos de medição a serem realizados na amostra (quatro pontos de medição). A partir destas informações foi definida a área entre os dois pinos centrais. O efeito de borda (distância dos furos em relação à borda da amostra), também foi levado em consideração. A espessura definida foi de 8 mm, considerando o volume de material removido durante a execução do furo (furo de aproximadamente 1 mm de profundidade e 1,8 mm de diâmetro). Por último, foi determinada a distância entre os pinos externos. Essa distância foi determinada de modo que a tensão máxima aplicada durante o ensaio fosse conseguida com um carregamento relativamente

baixo em relação a capacidade de carga da máquina, aumentando assim a segurança para o operador.

A Figura 15 apresenta as dimensões da amostra, bem como o posicionamento dos furos e a distância entre eles. A figura também apresenta a região onde as tensões aplicadas são homogêneas (região cinza).

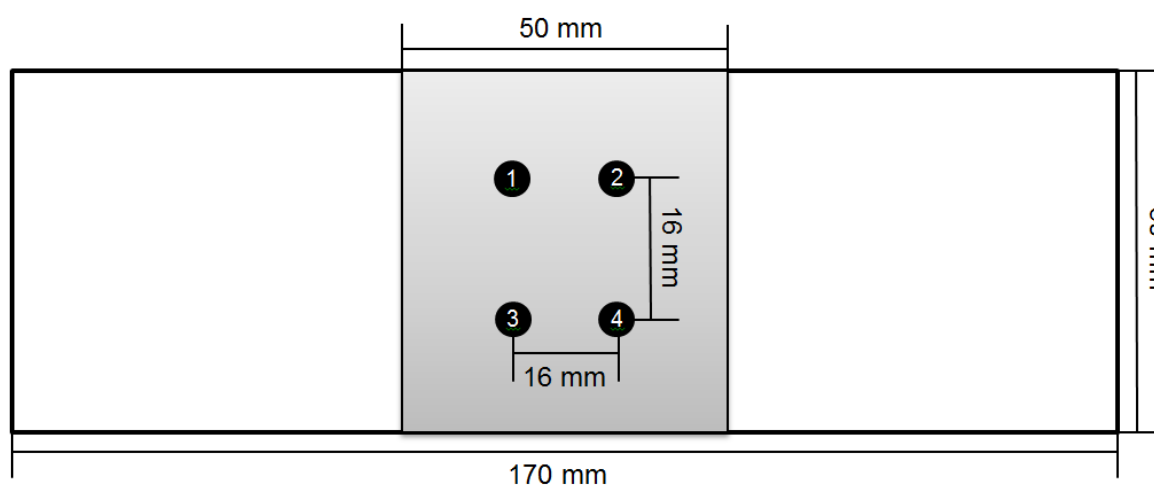


Figura 15: Dimensões da amostra padrão e localização dos pontos de medição.

3.2.3. Construção da máquina para aplicação de carregamento a 4 pontos

Para a concepção do projeto da máquina que aplica a carga na amostra foram considerados elementos fundamentais para o sucesso da aplicação.

O primeiro ponto a ser considerado é a distribuição do carregamento de modo que a carga seja distribuída uniformemente nos dois pinos de aplicação de carga, possibilitando a obtenção de uma região central com distribuição homogênea de tensões. O modelo também foi projetado a fim de permitir que o ensaio com o método do furo cego seja realizado de um modo fácil e seguro no momento em que ocorre o carregamento externo que é aplicado à amostra no momento do ensaio. Esta carga aplicada que deixa a tensão homogênea na região central da amostra deve ser mantida sem variação durante a execução dos ensaios para os quatro pontos de medição.

O modo de controle da carga aplicada deve ser sensível ao controle manual do operador, sendo seu ajuste de tensão eficiente. A máquina também foi projetada com válvulas para que o trabalho fosse operado com uma baixa pressão, a fim de contribuir com o aumento da segurança do operador.

A máquina, como mostra a Figura 16, consiste em duas bases fixas, inferior e superior, e uma base móvel, a qual é movimentada verticalmente através de uma mola pneumática. Durante o processo de aplicação de carga, o alinhamento desta base móvel é garantido por quatro pinos “guia”, fixados na base superior e pela própria mola pneumática.

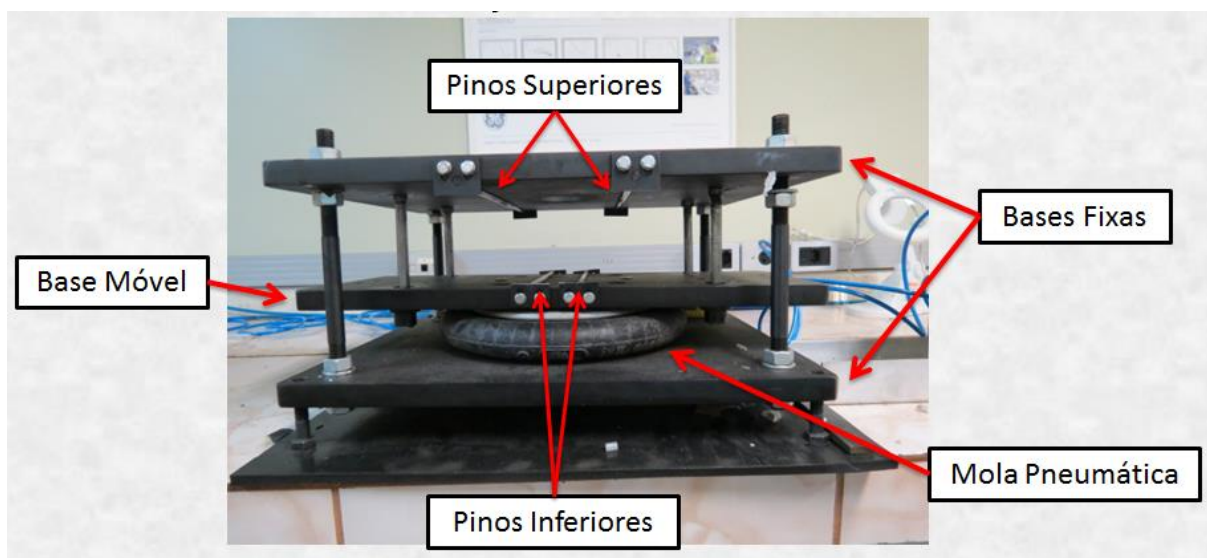


Figura 16: Vista frontal da máquina utilizada para aplicar carga a amostra.

A carga é aplicada através de uma mola pneumática, o sistema para o controle do carregamento está apresentado na Figura 17.

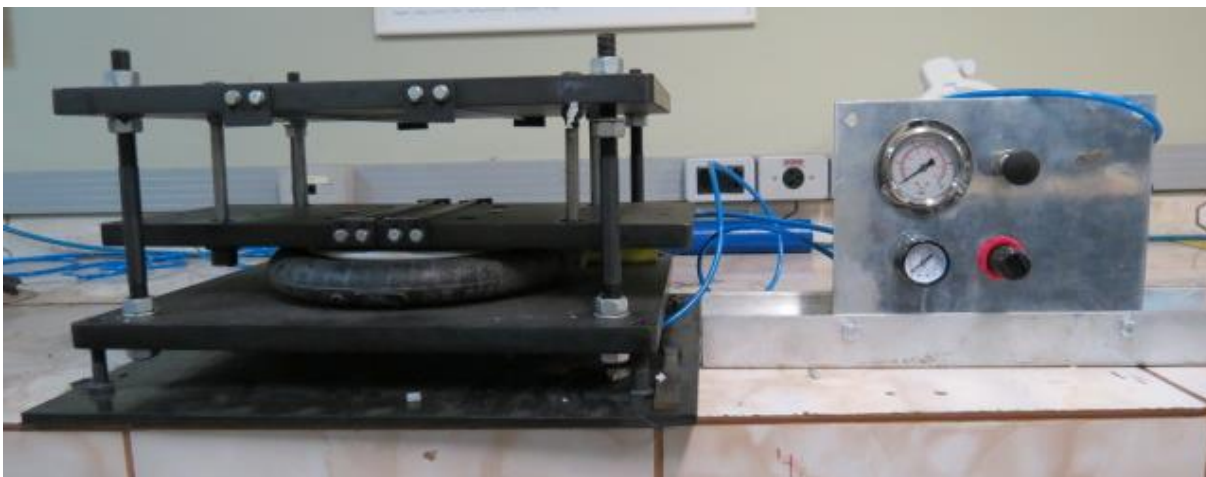


Figura 17: Apresentação da máquina para aplicação de carga por flexão a quatro pontos juntamente com o sistema de controle de pressão.

Para a realização do ensaio, no centro da base superior há uma abertura de 70 mm de diâmetro que permite o acesso da ferramenta de corte do equipamento do método do furo cego. Esta abertura é o suficiente para a prática dos quatro pontos na região central da amostra, como apresenta a Figura 18.

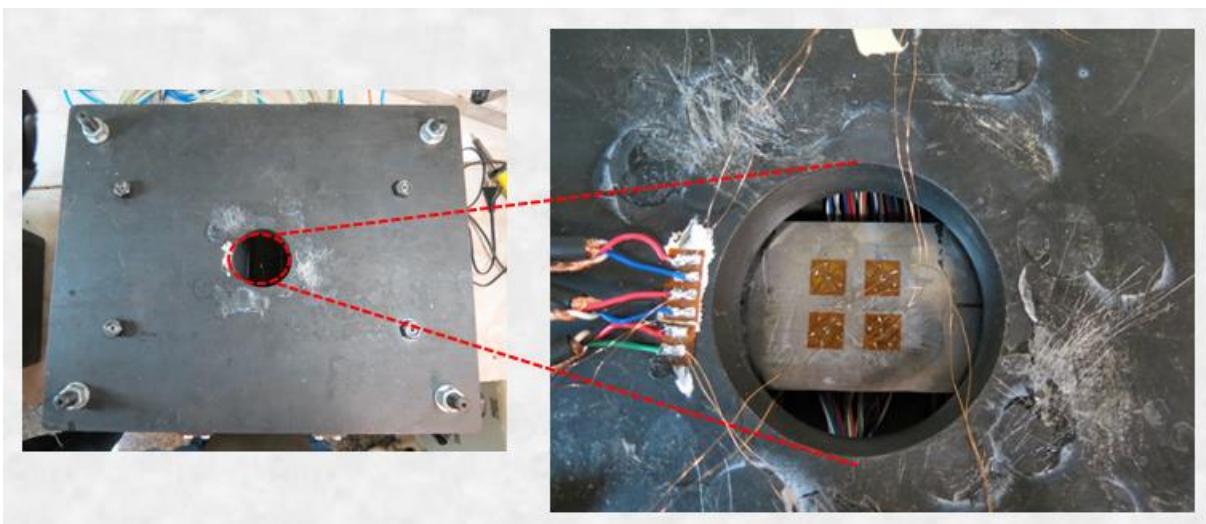


Figura 18: Vista da base superior com a abertura para o acesso da fresadora.

3.3. Cálculo da Incerteza de Medição

O estudo da incerteza inicia-se com a análise das variáveis que compõem todo o ensaio, para isso se fez uso de uma ferramenta da qualidade, o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de causa e efeito ou “espinha de peixe” onde são classificadas as fontes de incerteza do ensaio. A construção do diagrama facilita a observação de todas as causas do determinado ensaio. O problema definido de forma precisa é o primeiro passo para se construir o diagrama.

A finalidade do trabalho consiste na determinação da incerteza de medição para análise de tensões residuais pelo método do furo cego, assim foram dispostas as possíveis variáveis do ensaio no diagrama. Através da análise do diagrama nota-se que o operador exerce papel fundamental no ensaio.

Após o estudo do Diagrama de Ishikawa foram estabelecidas as grandezas de entrada que são fontes de incerteza, juntamente com a análise do modelo matemático escolhido como representativo do ensaio pelo MFC.

A Figura 19 apresenta o Diagrama de Ishikawa com as possíveis causas identificadas do problema.

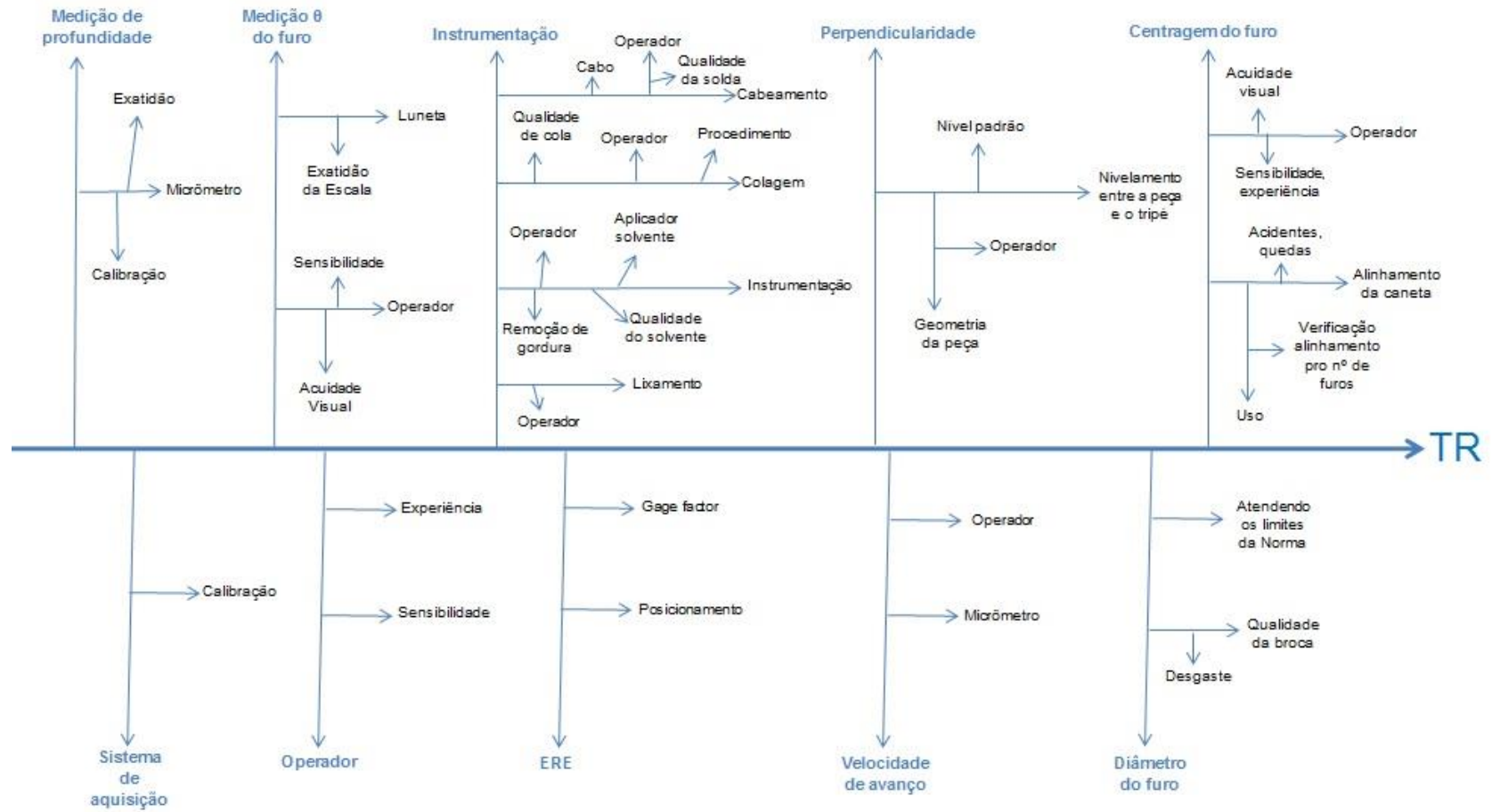


Figura 19: Diagrama de Ishikawa descrevendo as possíveis variáveis para o método do furo cego.

3.3.1. Descrição da Fonte de Incerteza

A descrição das fontes de incerteza juntamente com a distribuição de probabilidade de cada uma delas está disposta na Tabela 3.

Tabela 3: Distribuição de probabilidade para as fontes de incerteza.

Descrição das Fontes de Incerteza	Distribuição de Probabilidade
<i>Gage Factor</i> (ε_3)	Retangular
<i>Gage Factor</i> (ε_2)	Retangular
<i>Gage Factor</i> (ε_1)	Retangular
Divisão de Escala Luneta (K_x)	Triangular
Divisão de Escala Luneta (K_y)	Triangular
Divisão de Escala Luneta (X_i)	Triangular
Divisão de Escala do Micrômetro (K_x)	Triangular
Divisão de Escala do Micrômetro (K_y)	Triangular
Divisão de Escala do Micrômetro (X_i)	Triangular
Incerteza da Curva de Calibração (K_x)	t-Student
Incerteza da Curva de Calibração (K_y)	t-Student
Calibração Luneta (K_x)	t-Student
Calibração Luneta (K_y)	t-Student
Calibração Luneta (X_i)	t-Student
Calibração Micrômetro (K_x)	t-Student
Calibração Micrômetro (K_y)	t-Student
Calibração Micrômetro (X_i)	t-Student
Desvio Padrão de Repetitividade	t-Student

As fontes de incerteza referidas ao *Gage Factor* possuem uma distribuição de probabilidade do tipo retangular, isso quer dizer que esta fonte de incerteza é resolução do equipamento, não utilizando nenhum modelo matemático para seu cálculo.

3.3.2. Coeficiente de Sensibilidade

Após o estudo do modelo matemático escolhido para a análise de tensões residuais, obtemos as fórmulas para a análise da incerteza de medição. Para as fontes de incerteza da divisão de escala da luneta, da divisão de escala do micrômetro, da calibração da luneta e da calibração do micrômetro, são utilizados os modelos matemáticos mostrados nas equações (10), (11) e (12), apresentadas na revisão deste trabalho, a partir do tratamento destas tem-se o coeficiente de sensibilidade.

Os coeficientes de sensibilidade foram calculados para as três direções seguindo o modelo matemático de Kockelmann. As derivadas parciais foram calculadas em função das constantes K_x e K_y , como também para X_i , estas derivadas são apresentadas nas equações (14) a (22).

Para a direção a , em função de K_x :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_a(\xi)}{dK_x} = & \frac{-2EK_x}{\left((K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + vK_y(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \\ & + \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2} \left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Para a direção a , em função de K_y :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_a(\xi)}{dK_y} = & \frac{2Ev^2K_y}{\left((K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + K_y(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \\ & + \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2} \left(\frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Para a direção a , em função de X_i :

$$\frac{\delta\sigma_a(\xi)}{\delta d\xi} = \frac{-E}{(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{(d\xi)^2} + vK_y(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{(d\xi)^2} \right) \quad (16)$$

Para a direção b , em função de K_x :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_b(\xi)}{dK_x} = & \frac{-2EK_x}{\left((K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right. \\ & + vK_y(\xi) \left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \frac{d\varepsilon_b(\xi)}{d\xi} - \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \\ & \left. + \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2} \left(\frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Para a direção b , em função de K_y :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_b(\xi)}{dK_y} = & \frac{2Ev^2K_y}{\left((K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right. \\ & + K_y(\xi) \left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \frac{d\varepsilon_b(\xi)}{d\xi} - \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \\ & \left. + \frac{Ev}{(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2} \left(\frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

Para a direção b , em função de X_i :

$$\begin{aligned} \frac{\delta\sigma_b(\xi)}{\delta d\xi} = & \frac{-E}{(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2} \left[K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{(d\xi)^2} \right. \\ & \left. + vK_y(\xi) \left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{(d\xi)^2} + \frac{d\varepsilon_b(\xi)}{(d\xi)^2} - \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{(d\xi)^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

Para a direção c , em função de K_x :

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_c(\xi)}{dK_x} = & \frac{-2EK_x}{\left((K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} + vK_y(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right) \\ & + \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2} \left(\frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Para a direção c , em função de K_y :

$$\frac{d\sigma_c(\xi)}{dK_y} = \frac{2Ev^2K_y}{\left((K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} + vK_y(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right) + \frac{Ev}{\left(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(\frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} \right) \quad (21)$$

Para a direção c , em função de X_i :

$$\frac{\delta\sigma_c(\xi)}{\delta d\xi} = \frac{-E}{\left(K_x(\xi))^2 - v^2(K_y(\xi))^2\right)^2} \left(K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{(d\xi)^2} + vK_y(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{(d\xi)^2} \right) \quad (22)$$

As derivadas calculadas através do modelo matemático de Kockelmann configuram o coeficiente de sensibilidade para as variáveis que seguem o modelo matemático. As variáveis que não seguem este modelo podem ser herdadas ou então, como neste trabalho, devem se calculados através do desvio padrão da repetitividade.

A partir destes valores é construída a planilha para o cálculo da incerteza.

3.4. Material

Para a realização deste trabalho foram utilizadas 3 amostras de aço AISI 4140. A escolha deste aço foi devido ao alto valor da tensão de escoamento para não correr qualquer risco, durante a realização da usinagem do furo, de chegar a 50% do limite de escoamento, como foi visto na revisão bibliográfica isso causaria erros consideráveis. Estas amostras, como dito anteriormente, passaram por tratamento térmico para se obter uma baixa dureza, também foi realizado alívio de tensões para se obter uma superfície com tensões homogêneas.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A Tabela 4 apresenta a composição química do material de base utilizado nesse trabalho. A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica, conforme a Norma ASTM E1009. Em conjunto com as propriedades mecânicas obtidas com o ensaio de tração, foi possível classificar o material como um aço AISI 4140.

Tabela 4: Composição química do material de base. Valores percentuais em peso.

Composição química [% em peso]								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Fe
ABNT	0,38 – 0,43	0,75 – 1,00	0,030 máx.	0,040	0,15 – 0,35	0,8 – 1,10	0,15 – 0,25	-
Medido	0,399	0,941	0,0122	0,0547	0,311	0,849	0,196	Balanço

3.4.1. Métodos

3.4.1.1. Caracterização Microestrutural

A amostra foi cortada e preparada de acordo com procedimentos padrão para metalografia, conforme as normas ASTM E3-95 e ASTM E 340-95. Inicialmente, as amostras foram lixadas utilizando uma sequência de lixas variando da grade 120 até 1200.

Após a preparação metalográfica a amostra foi atacada com solução de Nital 3% por 15 segundos e então analisada em microscópio óptico.

3.4.1.2. Ensaio de Tração Instrumentado

Ensaio de tração foram conduzidos para três corpos de prova do material que tiveram a deformação monitorada com extensômetro de resistência elétrica tipo roseta biaxial e com *Clip Gage*. Este procedimento foi realizado para gerar dados que permitissem correlacionar os valores de deformação obtidos com essas diferentes técnicas.

3.4.1.3. Monitoramento com extensômetro de resistência elétrica

Uma das faces do corpo de prova foi instrumentada com um extensômetro tipo roseta biaxial e uma face lateral do corpo de prova foi instrumentada com um extensômetro uniaxial. As características destes extensômetros de resistência elétrica podem ser vistas na Tabela 5.

Tabela 5: Características dos EREs.

Características	Roseta Biaxial	ERE Uniaxial
Fabricante	Vishay Micro-Measurements	Kyowa Strain Gages
Modelo	L2A-06-062LT-120	KFG-2-120-C1-11
Tamanho da grade do ERE	2 mm	1,52 mm
Resistência elétrica	120 Ω	120 Ω
Compensação de temperatura	Para aço	Para aço
Deformação	3%	3%

A roseta biaxial foi instrumentada de modo que a direção da grade de um dos extensômetros ficasse alinhada com a direção longitudinal do corpo de prova. Os modelos de extensômetros de resistência elétrica utilizados para os ensaios de tração estão apresentados na Figura 20.

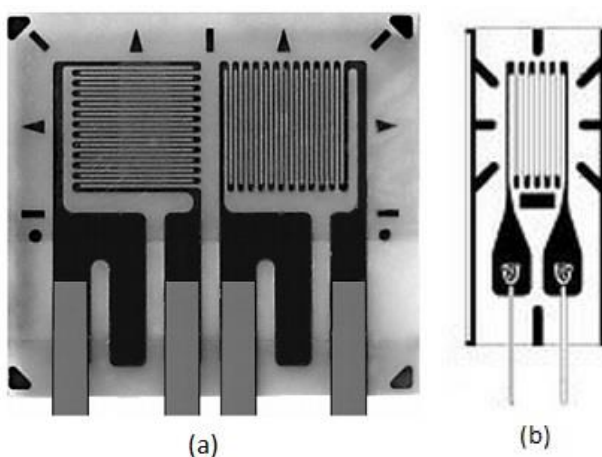


Figura 20: Extensômetros de resistência elétrica. (a) Modelo L2A-06-062LT-120 da Vishay Micro-Measurements. (b) Modelo KFG-2-120-C1-11 da Kyowa Strain Gages.

A instrumentação foi realizada conforme procedimentos padrão de lixamento, desengraxe, colagem e soldagem de extensômetros. O cabeamento é realizado de modo a conectar separadamente cada extensômetro de resistência elétrica da roseta num circuito do tipo ponte de Wheatstone em ligação de $\frac{1}{4}$ de ponte com três fios (BORCHARDT e ZARO, 1982) e (HOFFMANN, 1989). Para aquisição de dados foi utilizado um equipamento modelo MGC Plus da empresa HBM, Hottinger Baldwin Messtechnik. O software utilizado para a aquisição dos dados foi o Catman 4.0 fornecido pelo fabricante do equipamento.

Através do ensaio de tração instrumentado foi possível obter o coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade para este material.

3.4.2. Ensaio de Difração de Raio-X

A fim de verificar a distribuição de tensões residuais na superfície da amostra e avaliar a homogeneidade destas tensões, foi realizada uma caracterização de tensões residuais utilizando a técnica de difração de raios-X. Para isso, foram avaliados quatro pontos nas direções longitudinal e transversal. Sendo que os pontos foram medidos em posições específicas, coincidentes com os pontos de medição com o método do furo cego.

A caracterização de tensões residuais utilizando o método de difração de raio-X foi realizada em um difratômetro ψ (modo de inclinação lateral) marca GE modelo Seifert Charon XRD M – Research Edition, equipado com tubo de raios-X de Cr-K α com abertura primária de 2 mm de diâmetro e um detector linear de 20 $^\circ$ marca GE modelo Meteor 1D.

As linhas de difração {211} do ferro- α foram registradas para 27 ângulos de inclinação na faixa de $60^\circ < \psi < 60^\circ$, a faixa nos ângulos Theta e Omega utilizados foram 148-165 $^\circ$ e passo de 0,05 $^\circ$ com 10s de tempo de passo. As tensões residuais foram calculadas usando o método de $\sin^2 \psi$ com módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0.28 utilizando o software GE Analyze. O objetivo desta análise é a quantificação e distribuição das tensões residuais ao longo da amostra padrão.

3.4.3. Ensaio de Tensões Residuais pelo Método do Furo Cego

Para a realização do ensaio de tensões residuais pelo método do furo cego foram dispostos dois operadores com experiência para este trabalho. No intuito de conseguir repetitividade dos ensaios, foi analisada uma amostra por dia, em cada amostra foram usinados quatro furos, dois por operador, nas mesmas condições.

O modelo de extensômetro de resistência elétrica utilizado neste trabalho é uma roseta triaxial da marca Vishay Micro-Measurements, especial para análise de tensão residual pelo método do furo cego, este modelo é apresentado na Figura 21. Os parâmetros deste modelo de extensômetro de resistência elétrica estão dispostos na Tabela 6.

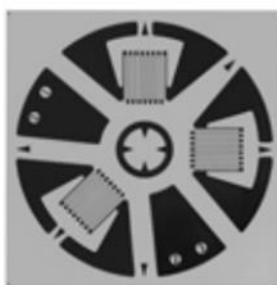


Figura 21: ERE triaxial especial para análise de tensões residuais pelo MFC.

Tabela 6: Características do extensômetro de resistência elétrica utilizado no ensaio do MFC.

Características	Roseta triaxial
Fabricante	Vishay Micro-Measurements
Modelo	EA-06-062RE-120/SE
Tamanho da grade do ERE	1,57 mm
Resistencia elétrica	120 Ω
Compensação de temperatura	Para aço
Deformação	3%

A amostra instrumentada na face oposta é posicionada na máquina, o posicionamento do corpo de prova deve ser preciso para que a flexão a quatro pontos aplique carga homogênea. Após o posicionamento da amostra, a máquina é acionada e inicia-se a aplicação do carregamento.

A partir dos extensômetros de resistência elétrica instalados na face oposta são monitoradas as tensões na amostra e ocorre o controle da estabilidade da carga. O carregamento é mantido constante e monitorado sua estabilidade antes do início do ensaio pelo método do furo cego.

A posição dos extensômetro de resistência elétrica está demarcada antecipadamente, ocorre então à preparação do local da colagem da roseta. Cada operador realizou dois ensaios por amostra, o ensaio de cada operador diz respeito desde o lixamento, a marcação, a limpeza, a colagem e a usinagem do furo propriamente.

A área demarcada é importante porque nesta região a tensão aplicada é homogênea. Para conseguir uma comparação entre as tensões residuais de vários ensaios através do método do furo cego é de suma importância ter uma amostra homogênea, ou uma região com tensões homogêneas.

A seguir são detalhados alguns pontos críticos que dependem da experiência do operador no momento do ensaio de tensão residual pelo método do furo cego:

Limpeza do local

A limpeza do local onde será instalado o extensômetro de resistência elétrica é a primeira preocupação, deve-se garantir que o local esteja limpo e desengordurado. Para evitar a contaminação do sensor, é essencial a utilização de pinças para movimentação do mesmo. Na limpeza do local do posicionamento do sensor na amostra é utilizada Acetona Pura.

Posicionamento e colagem do extensômetro

O posicionamento é importante para direcionar os resultados de tensão residual. A roseta possui três extensômetros de resistência elétrica, a orientação é posicionar um dos extensômetros no sentido longitudinal da amostra, conforme a configuração da roseta, o segundo extensômetro estaria na transversal da amostra e o terceiro a 45 graus dos demais. A Figura 22 apresenta estas orientações.

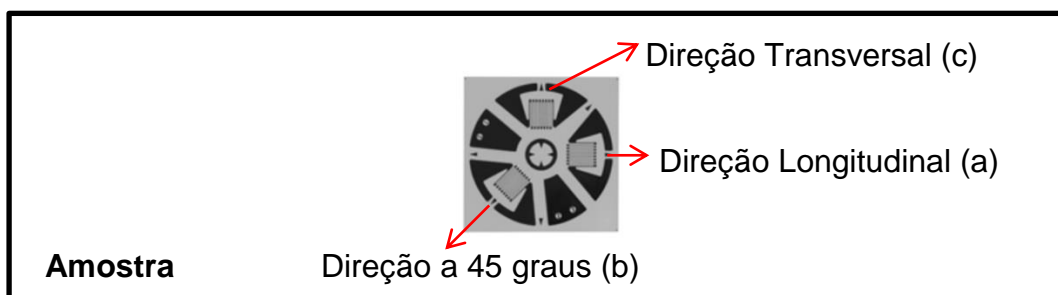


Figura 22: Posicionamento dos extensômetros tipo roseta na amostra.

A colagem também tem grande influência na medição devido à quantidade de cola utilizada. Excesso de cola pode influenciar na medida, não deve haver uma camada muito espessa de cola entre a roseta e a amostra, a medida pode ser influenciada pela cola e não ser necessariamente uma medição da amostra. Outro ponto é a falta de cola que pode ocasionar o descolamento da roseta, se esta não estiver bem aderida à amostra induzirá erros.

Estabelecer profundidade zero

A determinação da profundidade zero é complicada devido à sensibilidade necessária do operador. O extensômetro de resistência elétrica é feito por um polímero que possui uma espessura pequena e se soma a camada de cola, ao iniciar o ensaio deve-se retirar esta camada de polímero e cola, determinando a profundidade zero diretamente no metal. Este passo é muito importante em qualquer ensaio, mas neste trabalho se torna um ponto crítico pela comparação de mais de um operador. Se não ocorrer a retirada da camada do polímero pode acarretar um erro inicial que acaba por somar-se a todo o ensaio, bem como se esta camada for retirada de forma demasiada.

Excentricidade do furo

A excentricidade do furo é causa do posicionamento da fresadora no centro da roseta, a roseta possui um círculo no centro dos extensômetros para a usinagem

do furo. Ao posicionar o tripé, deve-se utilizar lupa micrométrica para ajustar a posição da fresadora e o local exato que o furo será realizado. O posicionamento não sendo correto acarreta na falta de excentricidade do furo. Este erro é atribuído a uma regulação incorreta que levará a uma ampliação ou minimização dos valores de deformação.

Perpendicularidade do furo em relação à superfície

A não perpendicularidade do furo é causa do desalinhamento do tripé em relação à amostra. A fresadora juntamente com a broca deve estar perfeitamente perpendicular em relação à superfície, o possível desalinhamento gera dificuldades no momento da usinagem do furo. Este é um dos pontos que deve ser analisado e depende da sensibilidade e experiência do operador.

Diâmetro do furo d_0

Após o término do ensaio, a fresadora é retirada do tripé e o diâmetro do furo é medido através da lupa micrométrica. Este passo também depende da habilidade do operador, pois se trata de uma medição visual.

Quando o monitoramento mostra que as tensões na face oposta estiverem constantes realiza-se o ensaio pelo método do furo cego. O equipamento é montado na máquina e são usinados os furos, para ilustrar a Figura 23 apresenta todos os equipamentos, o aparelho para aquisição de dados das tensões da face oposta e o aparelho para aquisição de dados das tensões no momento do furo, juntamente com a máquina aplicando carga na amostra.

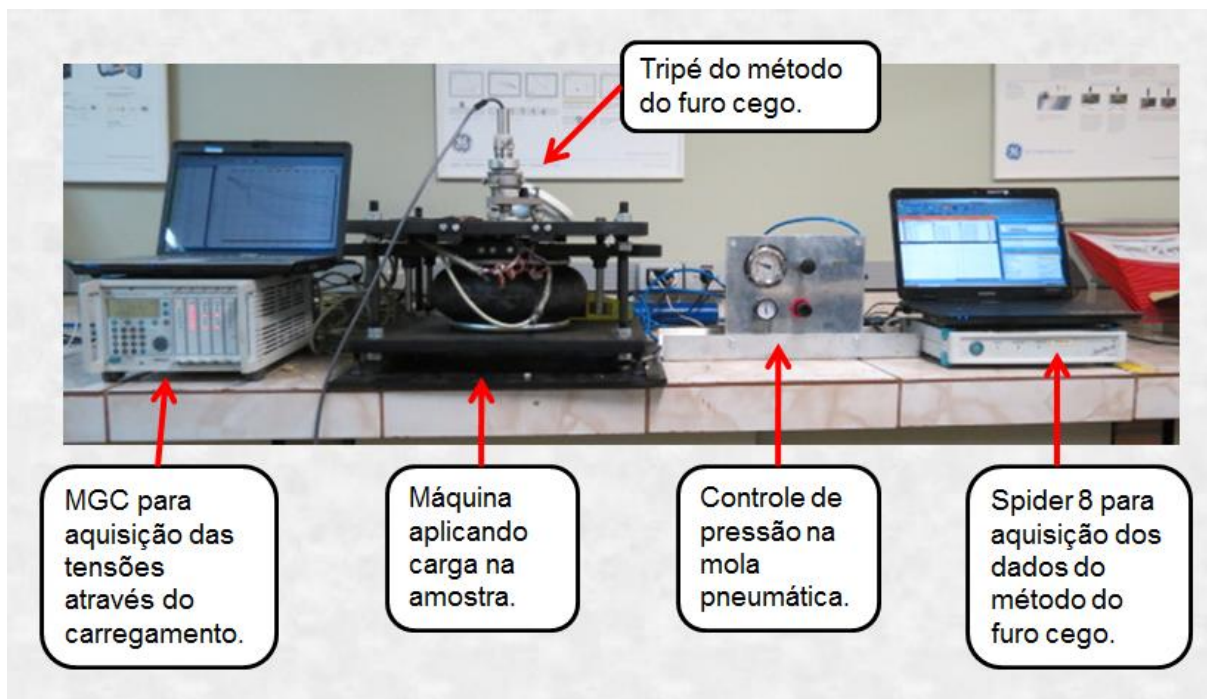


Figura 23: Computador com MGC Plus para aquisição de dados, máquina utilizada para aplicação de carga com o aparelho do MFC instalado e computador com Spider 8 para aquisição de dados do MFC.

Detalhes do posicionamento da amostra e localização do aparelho do método do furo cego estão dispostos na Figura 24. A amostra está sofrendo carregamento constante durante toda a usinagem do furo, nesta imagem é claro o posicionamento em um momento do ensaio.

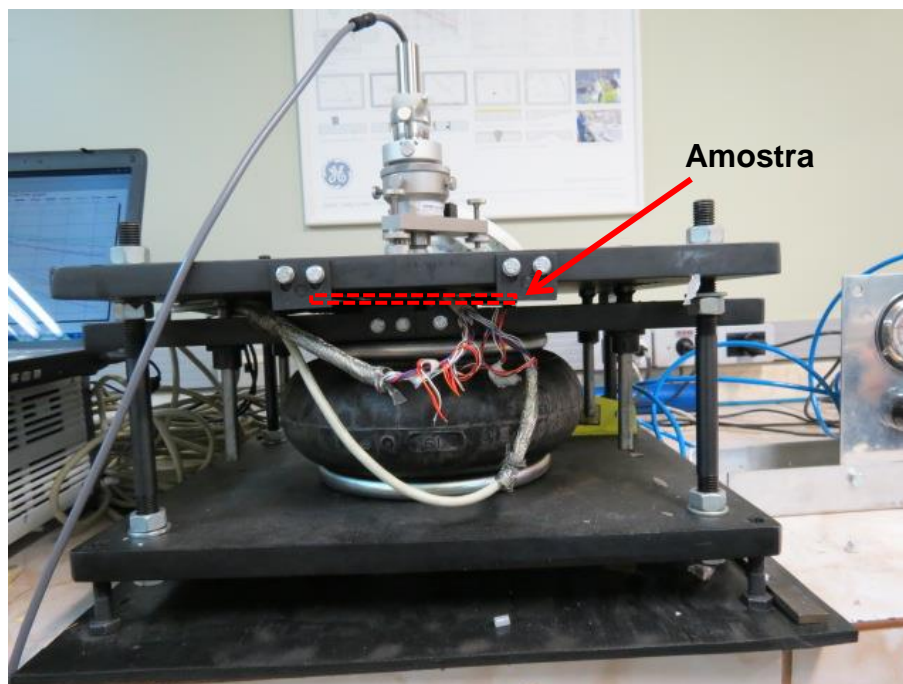


Figura 24: Posicionamento da amostra e equipamento montado.

A localização dos furos é apresentada na Figura 25, o tripé é posicionado para cada furo. No detalhe o tripé é posicionado para o quarto furo da amostra, nota-se a facilidade de posicionamento da fresadora.

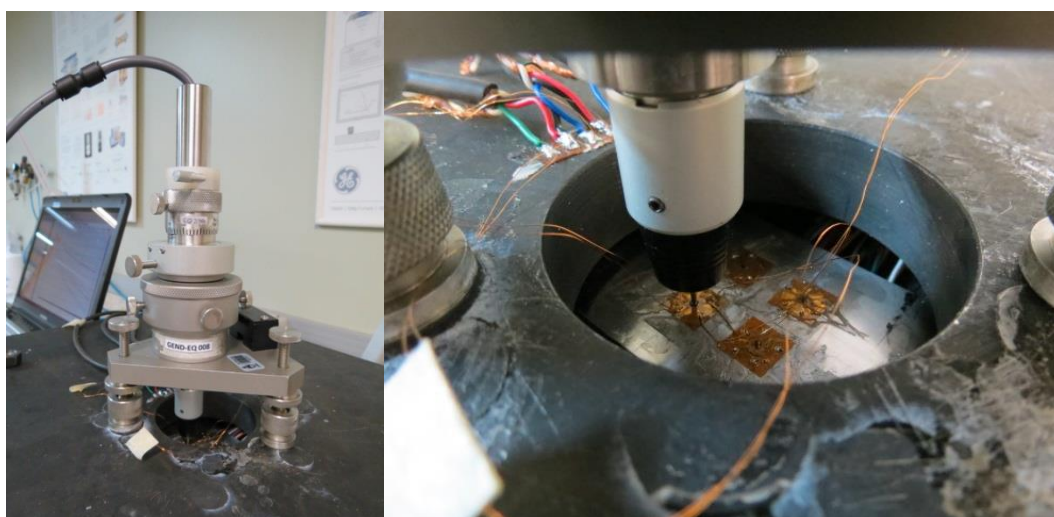


Figura 25: Tripé do método do furo cego montado na máquina e detalhe da fresadora com a broca posicionada no centro da roseta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos neste trabalho. No primeiro momento, será mostrada a análise do material das amostras, importante quesito para a segurança de um trabalho baseado em parâmetros do material utilizado. Nesta etapa se incluem a caracterização microestrutural para análise do material escolhido para a realização dos ensaios, os ensaios de tração instrumentados com extensômetros de resistência elétrica e *Clip Gage* que permitem analisar os parâmetros mecânicos do material, valores consideráveis para teste com aplicação de carregamento, e ensaio de difração de raio-X, onde foram analisadas as tensões presentes nas amostras nos mesmos pontos que seriam realizados os furos. Na segunda etapa serão analisados os resultados do monitoramento das tensões na face oposta das amostras, para assegurar se o carregamento imposto na amostra é aplicado de forma homogênea na amostra analisada no momento. Nesta mesma etapa são feitos os furos com o método do furo cego, são revelados os resultados de tensões residuais máximas e mínimas para cada furo, a partir destes valores será calculado o desvio padrão dos operadores. Os resultados de todas as etapas dos ensaios experimentais são fundamentais para a resposta do objetivo principal do trabalho que é a incerteza de medição para análise de tensão residual através do método do furo cego. As análises de incerteza são mostradas como parte final do trabalho, juntamente com a apresentação das planilhas de incerteza.

4.1. Caracterização Microestrutural

Metalografia

A análise metalográfica está apresentada na Figura 26.



Figura 26: Metalografia do material AISI 4140 recozido.

As metalografias apresentaram a estrutura esperada para o aço AISI 4140 recozido, a figura exibe uma estrutura composta de perlita e ferrita com alguns carbonetos formados possivelmente com o tratamento térmico. Esta formação de carbonetos pode acarretar algum desvio na homogeneidade do material.

DUREZA

Os resultados dos ensaios de dureza estão expostos na Tabela 7, foram realizadas três medições, a tabela apresenta a média e o desvio padrão das medidas.

Tabela 7: Medições de dureza em Rockwell C (HRC), a média e o desvio padrão das medidas.

Medições	1	2	3	Média	Desvio
Dureza (HRC)	34	35	36	35	1

O resultado da dureza do material foi satisfatório, devido ao tratamento térmico e ao alívio de tensões, o valor medido da dureza foi relativamente baixo, tendo uma média de 35 HRC.

4.2. Ensaio de Tração Instrumentado com ERE e *Clip Gage*

Os valores das principais propriedades do material obtidas por ensaio de tração estão dispostos na Tabela 8. Foram ao todo três amostras testadas para se obter as propriedades, dos resultados das propriedades foi extraída a média.

Tabela 8: Principais propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração.

Amostra	Tensão limite de escoamento [MPa]	Tensão limite de resistência à tração [MPa]	Alongamento [%]	Módulo de Elasticidade [MPa]	Coefficiente de Poisson
1	842	941	6,26	219635	0,28
2	859	946	7,02	191502	0,26
3	844	935	5,21	191722	0,26
Média	848	941	6,16	200953	0,27

A média para a tensão limite de escoamento foi de 848 MPa, considerado satisfatório para o proposto no trabalho, juntamente com o resultado médio da tensão limite de resistência à tração que foi de 941 MPa. A média para o módulo de elasticidade foi de 200.953 MPa. A média do coeficiente de Poisson para o material foi de 0,27.

4.3. Ensaio de Difração de Raio-X

Como todos os resultados da análise da posição do pico de difração e os níveis de tensões residuais em relação ao sen^2 do ângulo Psi se revelaram muito similares será apresentado um exemplo de cada gráfico destes resultados na Figura 30 e na Figura 31.

A partir da medição dos picos de difração a análise da posição central do pico de difração foi realizada utilizando o método de centro de gravidade considerando-se 20% da altura máxima do pico, mostrado na Figura 27.

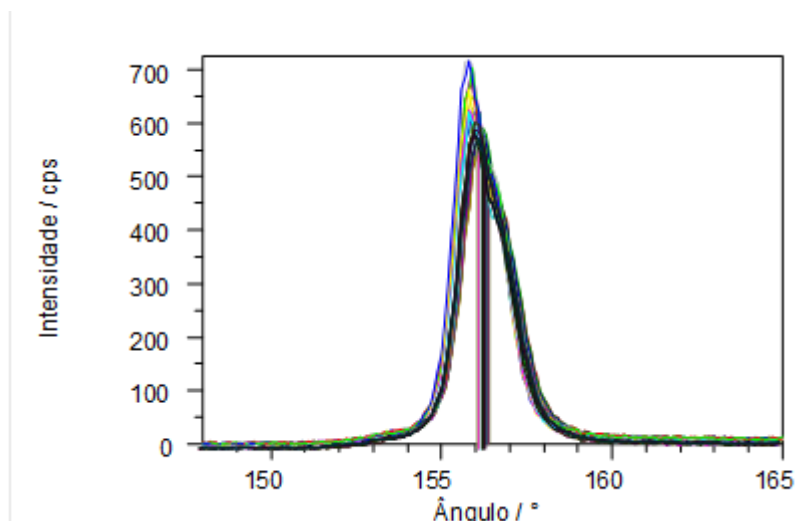


Figura 27: Análise da posição central dos picos de difração, método de centro de gravidade do ângulo theta no eixo X.

Na Figura 28 está representado o gráfico de tensões residuais pelo método $\text{Sen}^2(\text{Psi})$, este resultado como de todas as amostras mostrou-se linear. Este comportamento é um bom indicativo de uma medição adequada e que o material possui uma microestrutura homogênea sem a presença de textura.

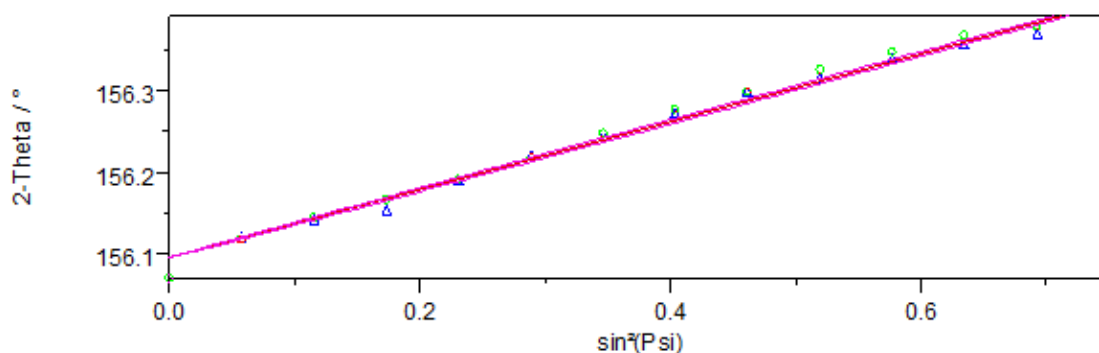


Figura 28: Avaliação de tensões residuais pelo método $\text{Sen}^2(\text{Psi})$.

Nas Figura 29, 31 e 32 estão dispostos os resultados de tensões residuais adquiridos através dos ensaios de difração de raio-X, bem como valores da largura a meia altura (FWHM). Para tanto, são apresentados os resultados das amostras 01, 02, e 03 nas faces A e B de cada corpo de prova.

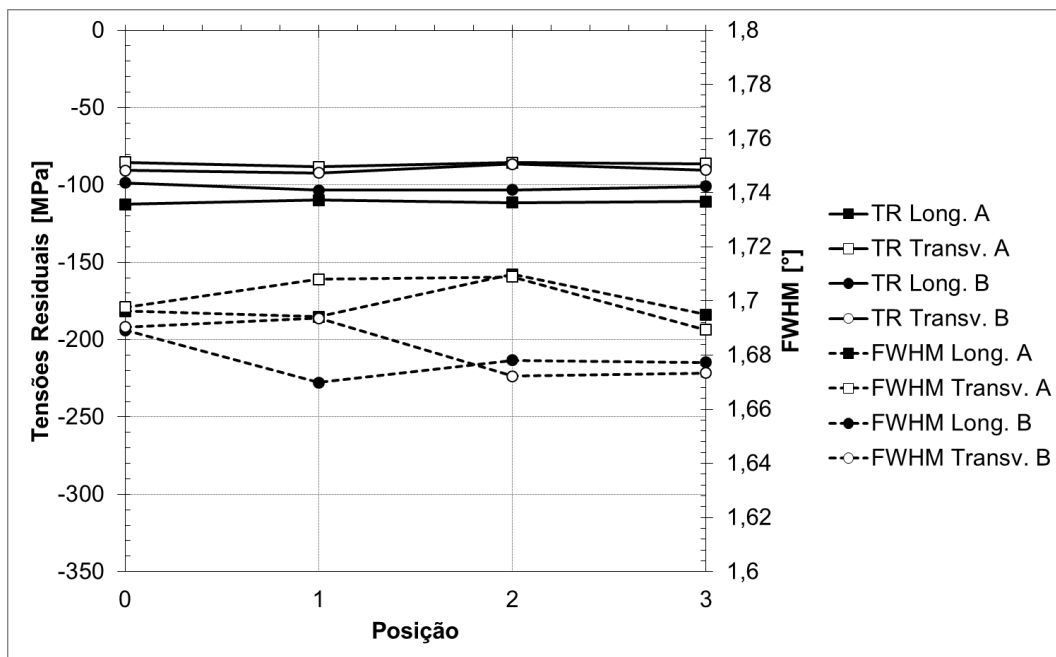


Figura 29: Resultados da análise de tensões residuais pelo método de difração de raio-X e do FWHM para amostra 01.

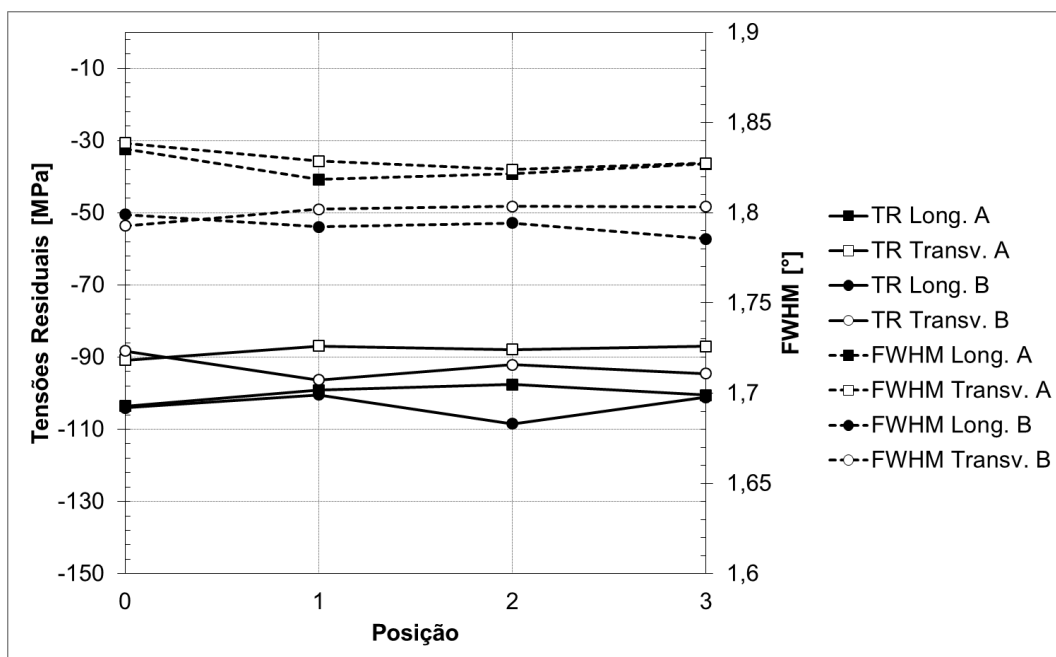


Figura 30: Resultados da análise de tensões residuais pelo método de difração de raio-X e do FWHM para amostra 02.

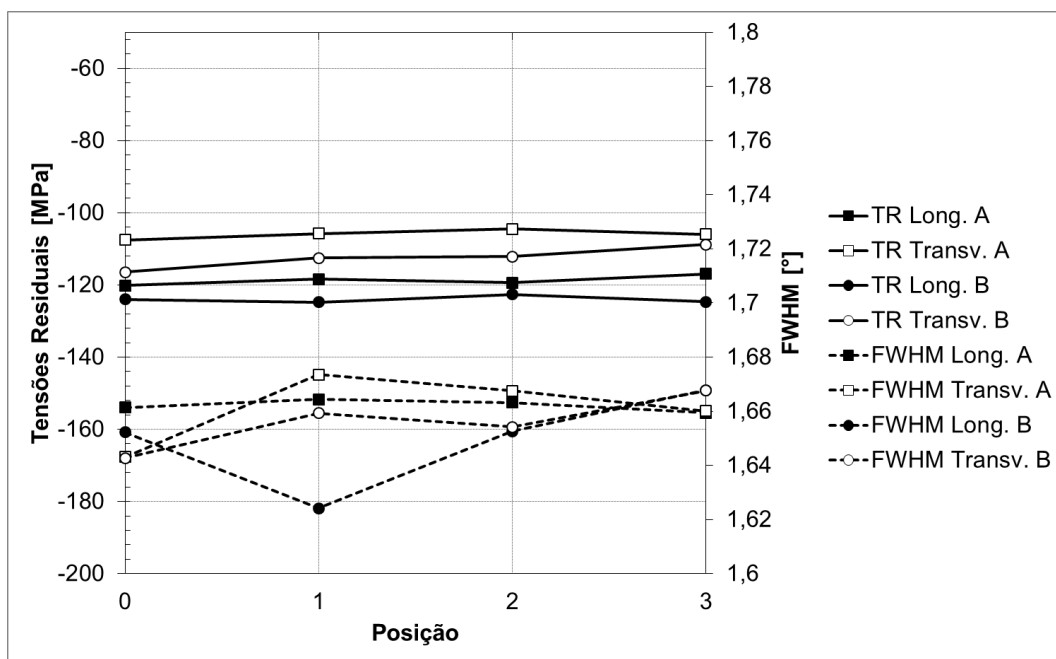


Figura 31: Resultados da análise de tensões residuais pelo método de difração de raio-X e do FWHM para amostra 03.

Ao verificar os resultados das tensões residuais analisadas pelo método de difração de raio-X, nota-se que as tensões tanto na direção longitudinal, quanto na direção transversal se mantiveram de forma constante e tiveram comportamento compressivo, entre 90 MPa a 120 MPa. A variação da largura a meia altura do pico de difração também manteve resultados regulares mantendo valores de 1,6 a 1,8, mostrando certa homogeneidade nos pontos mostrados separadamente para cada lado das amostras.

Na Tabela 9 são apresentadas as tensões residuais analisadas para cada ponto na direção longitudinal das amostras. Estão divididas pelo lado das amostras (Lado A e Lado B), e também pelas amostras analisadas (01, 02 e 03). Juntamente com os resultados de tensões, estão dispostos na tabela, a média e o desvio padrão, que foram calculados levando em consideração o lado da amostra.

Através do desvio padrão analisado para todos os pontos de cada lado da amostra, notamos um baixo nível de variação dos mesmos. O comportamento dos desvios para as tensões residuais na direção longitudinal ficou abaixo de 4 MPa.

Tabela 9: Resultados de tensões residuais na direção longitudinal obtidos através de análise pelo método de difração por raio-X.

Tensões residuais na direção longitudinal [MPa]						
	Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03	
	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
Ponto 1	-110	-99	-104	-104	-120	-124
Ponto 2	-109	-103	-99	-112	-118	-125
Ponto 3	-111	-103	-98	-108	-119	-122
Ponto 4	-111	-101	-100	-112	-117	-125
Média	-110	-101	-100	-109	-119	-124
Desvio	0,99	2,23	2,54	3,67	1,42	1,01

Os resultados das tensões residuais na direção transversal analisados pelo método de difração de raio-X estão apresentados na Tabela 10. Bem como os resultados na direção longitudinal, estes estão apresentados considerando os pontos analisados, os lados das amostras (Lado A e Lado B) e as amostras (01, 02 e 03). A média e o desvio padrão em relação a cada lado da amostra também estão dispostos na tabela, o desvio para cada lado da amostra apresentou baixa amplitude ficando abaixo de 4 MPa.

Tabela 10: Resultados de tensões residuais na direção transversal obtidos através de análise pelo método de difração por raio-X.

Tensões residuais na direção transversal [MPa]						
	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
Ponto 1	-85	-85	-91	-88	-107	-116
Ponto 2	-88	-83	-87	-96	-106	-112
Ponto 3	-85	-86	-88	-92	-110	-112
Ponto 4	-86	-90	-87	-95	-106	-109
Média	-86	-86	-88	-93	-107	-112
Desvio	1,34	3,02	1,82	3,47	1,80	3,15

O desvio padrão apresentado pela análise nos pontos ficou abaixo do erro do próprio difratômetro. Comprovando assim a linearidade de tensões residuais em cada amostra.

4.4. Tensão Monitorada na Face Oposta (Lado B) das Amostras

Através das deformações medidas no Lado B das amostras foram calculadas as tensões máximas e mínimas. As análises dos resultados estão apresentadas na Figura 32 a Figura 34. Nas figuras estão representadas as curvas da aplicação da carga nas amostras, os gráficos exibem os resultados de tensão dos quatro pontos através do tempo. Os resultados apresentados foram satisfatórios em termos de uniformidade de deformação através do carregamento aplicado.

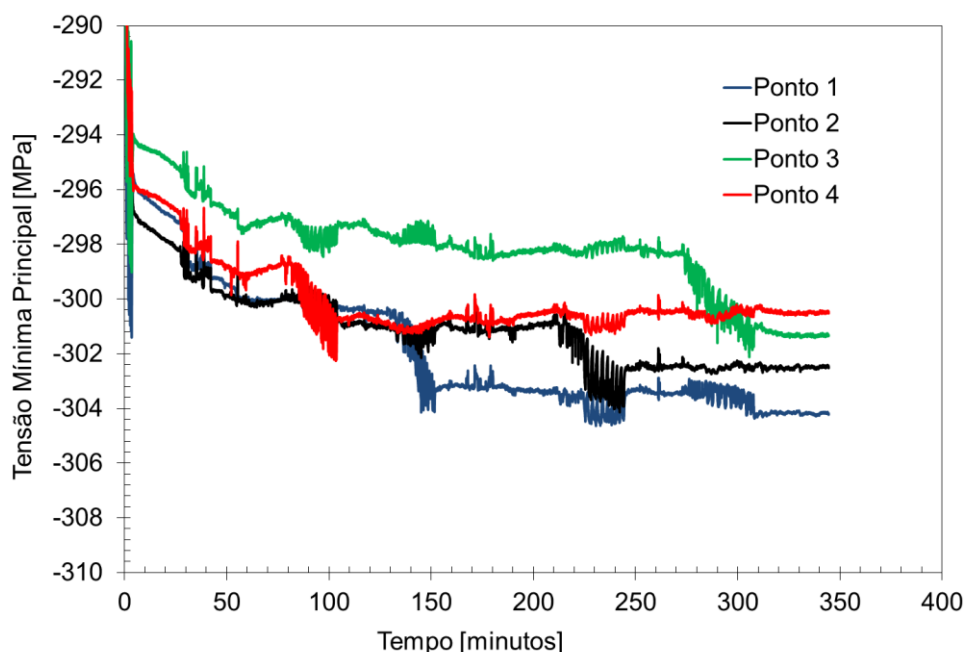


Figura 32: Resultado da comparação da tensão mínima principal para os quatro pontos monitorados na face oposta na amostra 01.

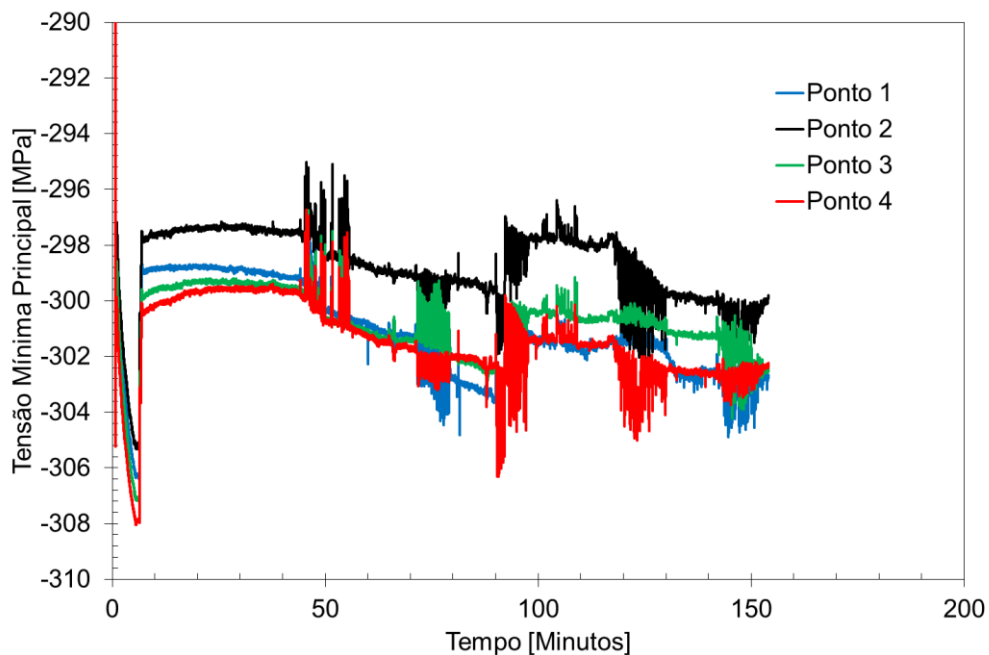


Figura 33: Resultado da comparação da tensão mínima principal para os quatro pontos monitorados na face oposta na amostra 02.

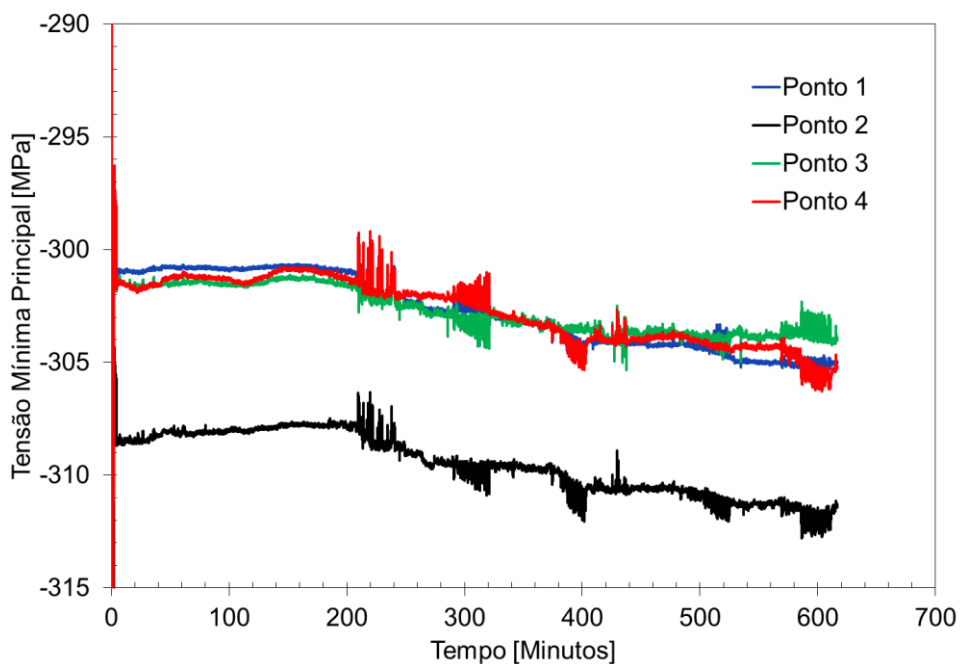


Figura 34: Resultado da comparação da tensão mínima principal para os quatro pontos monitorados na face oposta na amostra 03.

Os resultados do monitoramento da face oposta das amostras apresentaram uma variação de até 10 MPa na tensão mínima principal. Esta amplitude de

resultados é considerada desprezível considerando a tentativa de manter o valor em -300 MPa.

Na Tabela 11 estão apresentados os valores máximos e mínimos de cada ponto por amostra. A tensão aplicada é estabilizada nos valores de mínimo por tratar-se de tensões compressivas. Os pontos de máximo comprovam a estabilidade do sistema no início da aplicação da carga, com o carregamento as tensões continuaram equilibradas. Ocorre uma diferença de tensões de pequena amplitude entre as amostras. Nesta tabela também estão demonstradas as médias e os desvios para cada ponto.

Tabela 11: Mínimo e máximo valor para cada ponto e para cada amostra no monitoramento das tensões na face oposta.

Mínimo e máximo valor da tensão mínima principal da face oposta (Lado B)						
	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Ponto 1	-305	0,004	-306	0,022	-319	1,94
Ponto 2	-304	0,001	-305	0	-327	3,07
Ponto 3	-302	0,021	-307	0,015	-320	2,98
Ponto 4	-302	0,003	-308	-0,022	-320	2,59
Média	-303	0,0072	-307	0,0037	-322	2,64
Desvio	1,29	0,0093	1,11	0,019	3,74	0,51

4.5. Método do furo cego

Os resultados da tensão máxima principal e a tensão mínima principal são analisados para cada furo, da Figura 35 a Figura 37: Resultado da tensão máxima principal e da tensão mínima principal para a amostra 03. estão expostos os resultados da amostra 01, 02 e 03.

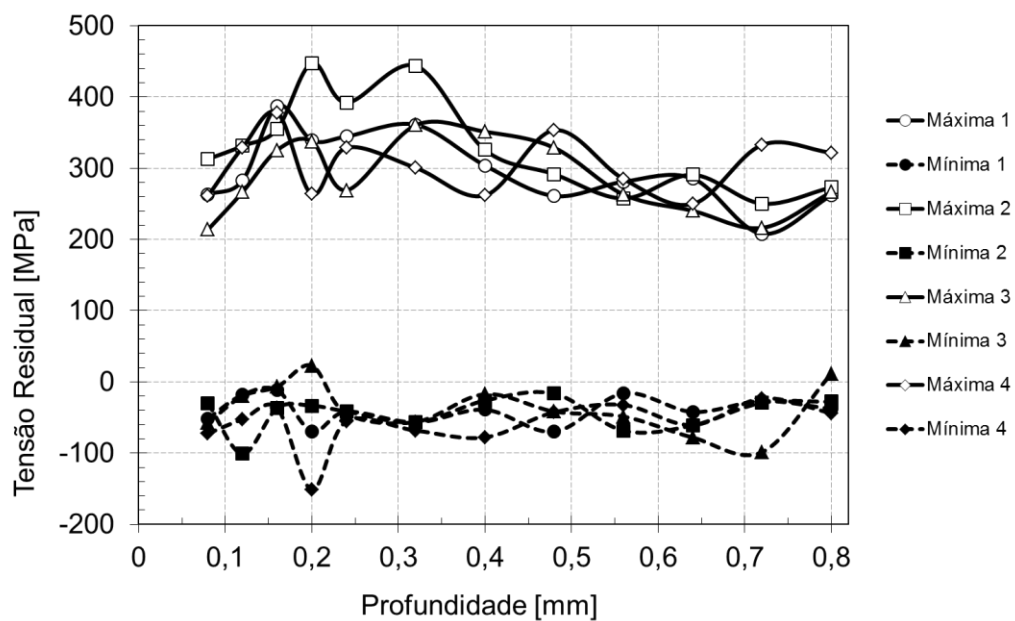


Figura 35: Resultado da tensão máxima principal e da tensão mínima principal para a amostra 01.

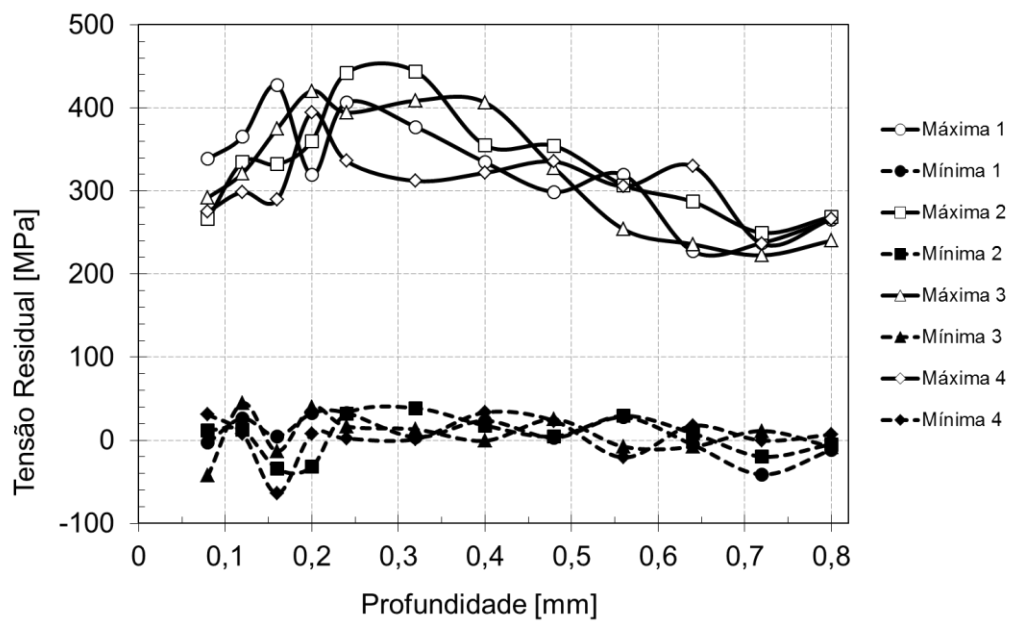
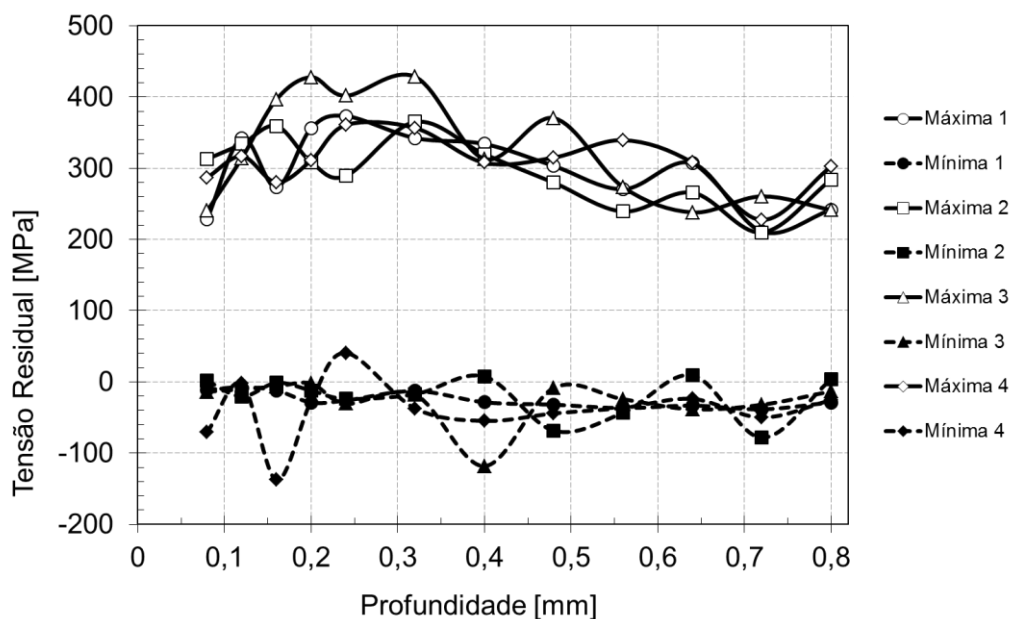


Figura 36: Resultado da tensão máxima principal e da tensão mínima principal para a amostra 02.



z

Figura 37: Resultado da tensão máxima principal e da tensão mínima principal para a amostra 03.

As curvas das tensões máximas e mínimas principais mostram que os resultados tiveram um comportamento semelhante. Vale lembrar que os resultados de tensões residuais exibidos pelo método de difração de raio X também apresentavam diferença entre os pontos de cada amostra, o que resulta em uma diversidade anterior ao método do furo.

As tensões mínimas principais para todos os pontos das três amostras exibiram valores de tensão muito próximos de zero. Com base nestes resultados utilizaram-se as tensões máximas principais para o estudo do erro do operador.

As tensões máximas principais mantiveram um perfil a partir da profundidade do furo. Uma ligeira queda nos valores de tensões máximas principais é visualizada nas figuras, o que significa que conforme a profundidade do furo, o nível de tensões residuais diminuir.

4.6. Cálculo do erro do operador

Para a obtenção do desvio padrão do erro do operador foram utilizadas as tensões residuais máximas principais do método do furo cego. Através dos resultados destas tensões foi obtido o desvio de repetitividade.

A comparação dos perfis de tensão residual máxima principal para todos os pontos analisados nas amostras 01, 02 e 03 são mostrados na Figura 38 e na Tabela 12. Na figura tem-se uma base geral do comportamento das tensões para todos os pontos de todas as amostras pela profundidade do furo. Também na Figura 38 está apresentada a linha de mínimo e de máximo das tensões máximas principais, mostrando o comportamento das medidas.

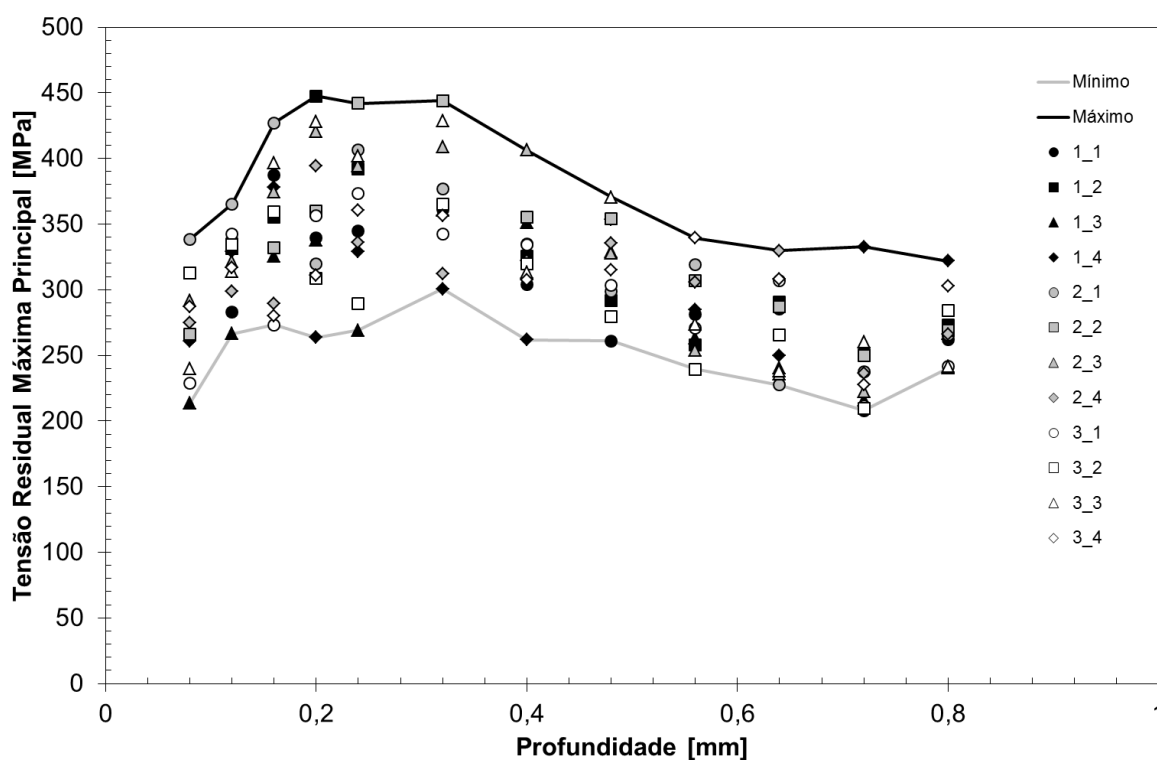


Figura 38: Comparação dos resultados da tensão máxima principal para os quatro furos das amostras 01, 02 e 03, com a linha de mínimo e de máximo das tensões máximas principais.

Na Tabela 12 estão dispostos todos os valores de tensão máxima principal, para todos os pontos e todas as amostras conforme os incrementos de profundidade do furo. Também nesta tabela encontra-se a distribuição dos pontos por operador. O operador 1 foi responsável pelos furos nos pontos 1 e 4 de todas as amostras, enquanto o operador 2 foi responsável pelos furos nos pontos 2 e 3 de todas as amostras.

Tabela 12: Valores de tensões residuais máximas para todos os pontos e amostras.

Tensão residual máxima principal [MPa]												
	Amostra 01				Amostra 02				Amostra 03			
Pontos	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Profundidade [mm]	Op.1	Op.2	Op.2	Op.1	Op.1	Op.2	Op.2	Op.1	Op.1	Op.2	Op.2	Op.1
0,08	263	313	214	261	339	266	292	275	228	313	240	287
0,12	283	331	266	329	365	335	321	299	342	334	314	317
0,16	387	355	325	378	427	332	375	289	273	359	397	280
0,20	339	447	338	264	320	360	420	394	356	309	428	311
0,24	345	392	269	329	406	442	395	336	373	289	402	361
0,32	361	444	360	301	377	444	409	312	342	365	428	357
0,40	304	326	351	262	335	355	406	322	334	320	313	308
0,48	261	292	329	353	299	354	328	335	303	280	370	315
0,56	281	258	263	285	319	307	254	306	271	239	273	339
0,64	286	291	240	250	227	287	236	330	307	266	238	308
0,72	208	250	216	333	237	250	222	236	211	210	261	227
0,80	262	273	416	322	266	269	240	266	242	284	241	302

A Tabela 13 apresenta a média e o desvio padrão por amostra e para cada incremento. Analisando o desvio de repetitividade por amostra observa-se na tabela um valor abaixo de 25% de variação.

Tabela 13: Valores de média e desvio padrão para cada amostra.

Média e desvio para cada amostra por incremento						
Profundidade [mm]	Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03	
	Média [MPa]	Desvio [%]	Média [MPa]	Desvio [%]	Média [MPa]	Desvio [%]
0,08	263	0,15	293	0,11	267	0,15
0,12	302	0,11	330	0,08	327	0,04
0,16	362	0,08	356	0,17	327	0,18
0,20	347	0,22	373	0,12	351	0,16
0,24	334	0,15	395	0,11	356	0,13
0,32	366	0,16	385	0,15	373	0,10
0,40	311	0,12	354	0,11	319	0,04
0,48	309	0,13	329	0,07	317	0,12
0,56	272	0,05	296	0,10	281	0,15
0,64	267	0,09	270	0,18	280	0,12
0,72	252	0,23	237	0,05	227	0,10
0,80	281	0,10	260	0,05	267	0,12

Para melhor ilustrar a diferença do desvio padrão a Figura 42 apresenta o desvio de repetitividade para cada amostra pela profundidade, nota-se que foi obtido um desvio menor do que 25%.

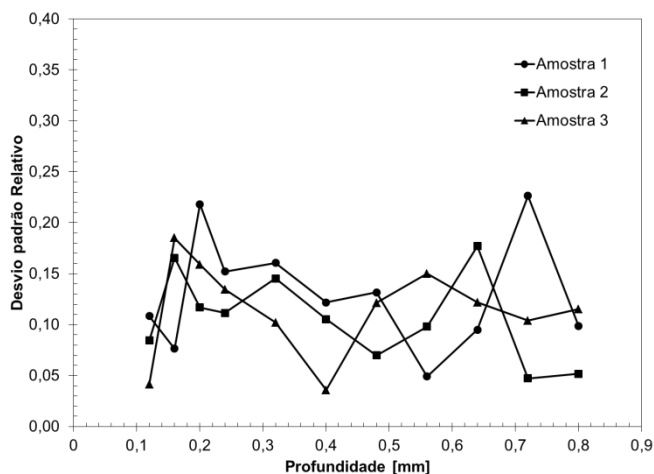


Figura 39: Comparação entre as amostras do coeficiente de variação com a profundidade.

4.7. Desvio padrão da repetitividade

Na Tabela 14 estão expostos à média e o desvio para cada incremento do ensaio, nota-se que se obteve um resultado com desvio abaixo de 15% de variação, resultado menor do que o apresentado por amostra.

Tabela 14: Valores de média e desvio padrão total.

Média e desvio padrão total		
Profundidade	Média	Desvio
[mm]	[MPa]	[%]
0,08	274	0,13
0,12	320	0,08
0,16	348	0,14
0,20	357	0,16
0,24	361	0,14
0,32	375	0,13
0,40	328	0,11
0,48	318	0,10
0,56	283	0,10
0,64	272	0,12
0,72	238	0,14
0,80	269	0,09

A Figura 40 apresenta o desvio para cada operador, onde se obteve um desvio menor do que 25% como na comparação por amostra.

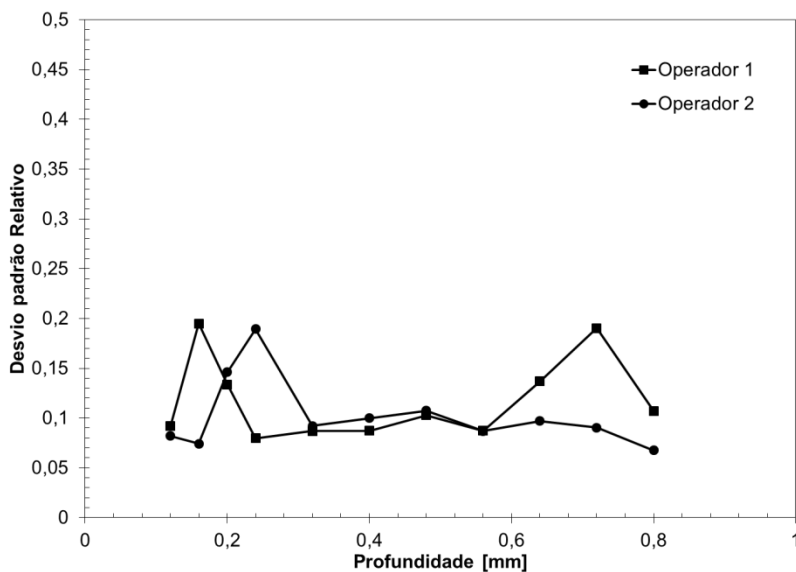


Figura 40: Comparação entre os operadores do coeficiente de variação com a profundidade.

Para a análise da incerteza de medição global da medição das tensões residuais pelo método do furo cego foi utilizado o desvio de repetitividade total. A Figura 41 apresenta graficamente os valores e variações deste desvio pela profundidade, ficando abaixo de 20% de variação. Pela figura nota-se que ocorre maior variação nos primeiros e nos últimos incrementos, exatamente como ocorre nos resultados de tensão máxima e mínima do método do furo cego.

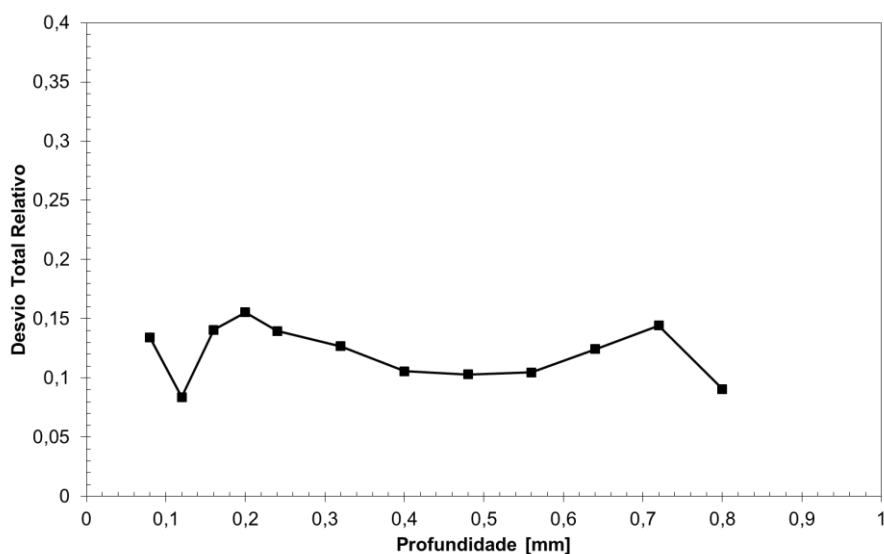


Figura 41: Variação do coeficiente de variação total pela profundidade.

4.8. Homogeneidade das tensões nas amostras

Utilizando os resultados de desvio padrão das medidas através do método de difração de raio-X e do desvio padrão da tensão mínima principal através do carregamento na amostra, foi possível obter um valor de desvio padrão que está implícito na amostra antes do ensaio através do método do furo cego. Na Tabela 15 estão expostas as médias e o desvio padrão para cada amostra, diferenciando a difração de raio-X e o monitoramento durante o carregamento.

A soma dos desvios padrões obtidos está apresentada na Tabela 15, este valor é referente a cada amostra. O desvio padrão utilizado para a soma referente ao método de difração de raio-X é apenas do lado B das amostras.

Tabela 15: Soma do desvio padrão da difração de raio-X com o desvio padrão do monitoramento durante o carregamento.

		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Difração de Raio-X	Média [MPa]	-303	-307	-322
	Desvio	1,29	1,11	3,74
Monitoramento	Média [MPa]	-191	-196	-237
	Desvio	4,60	7,16	4,17
Total	Desvio	5,89	8,27	7,91

O desvio padrão obtido através da soma de outros desvios, mostra que a homogeneidade não é completa nas amostras, este resultado sugere que o desvio padrão total já tenha incluído este desvio padrão inicial. Os valores são de pequena ordem, o que possibilitou a execução do ensaio com confiança.

4.9. Planilha da Incerteza de Medição

A planilha para o cálculo da incerteza de medição na análise de tensões residuais pelo método do furo cego foi gerada para cada incremento relevante do furo. A análise inicia no incremento 3 e finaliza no incremento 14, os incrementos 1, 2, 15 e 16 não são analisados devido a alta discrepância dos mesmos, para todos os resultados são excluídos estes incrementos.

5. CONCLUSÕES

A metodologia utilizada se mostrou adequada ao caso, permitindo determinar com sucesso a incerteza de medição global para o ensaio de tensões residuais pelo método do furo cego.

A não completa homogeneidade da microestrutura das amostras pode ter gerado resultados não coerentes entre pontos medidos tanto pelo método de difração de raio-X quanto pelo método do furo cego, proporcionando o possível aumento do valor de incerteza através da dispersão dos resultados do desvio de repetitividade.

O procedimento utilizado para determinação da incerteza de medição devido ao erro do operador atendeu de maneira bastante satisfatória o seu propósito.

As medições com difração de raio-X revelaram uma grande homogeneidade de tensões residuais na superfície das amostras, evidenciando o sucesso do tratamento térmico na homogeneização das tensões residuais.

A máquina construída para a aplicação do carregamento nas amostras foi essencial para se conseguir um campo homogêneo de tensões. O monitoramento das tensões durante a realização dos ensaios revelou uma pequena variação durante o período. Esta variação contribuiu também para a variação do desvio de repetitividade.

Os valores de incerteza de medição encontrados para o MFC nesse trabalho estão de acordo com o esperado. Embora sejam valores razoavelmente elevados, são plenamente justificáveis devido a complexidade do método, sobretudo a forte susceptibilidade ao erro do operador.

A planilha de cálculo desenvolvida permite determinar com facilidade e confiabilidade o valor da incerteza de medição para cada ensaio.

O objetivo principal do trabalho foi alcançado pelo fato do LAMEF ter recebido a acreditação do ensaio pelo método do furo cego para tensões residuais do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar o perfil das tensões residuais pelo método de difração de raio-X através de remoção de camada eletrolítica, comparando assim o perfil das tensões pelo métodos de difração de raio-X e do furo cego.

Comparação intralaboratorial, ou seja, ensaios para resposta de reprodutibilidade, comparando não apenas operadores como também equipamentos.

Aperfeiçoar a amostra padrão, como mudança de material, condições de tratamento térmico, dimensões, etc. A fim de diminuir o desvio padrão dependente da homogeneidade da amostra.

Aprimorar a máquina para aplicação do carregamento na amostra, melhorando a estabilidade da carga e o equilíbrio da carga nos pontos que serão ensaiados.

7. REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO/IEC 17025, A. B. D. N. T. **Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração**. Rio de Janeiro, 2005.

ALEXANDRU, I.; BULANCEA, V. Effect of Cryogenic Cooling of Residual Stresses, Structure, and Substructure. In: TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. 1. ed.: The Materials Information Society, v. 1, 2002. p. 331-344.

API-579, A. P. I. **Fitness for Service**. Washington, 2000.

ASTM-E837, A. S. F. T. A. M. **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method**. Pensilvânia, 2013.

BARSANESCU, P.; CARLESCU, P. Residual Stress Measurement by the Hole-Drilling Strain-Gage Method: Influence of Hole Eccentricity. **International Measurement Confederation - IMEKO**, 2004.

BELL, S. **A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement**. 2. ed. Middlesex: National Physical Laboratory, 1999.

BHADESHIA, H. K. D. H. Material Factors. In: TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. 1. ed.: The Materials Information Society, 2002. Cap. 3.

BORCHARDT, I. G.; ZARO, M. A. **Extensômetro de Resistência Elétrica (Strain Gauges) - Princípios de Operação e Utilização de Transdutores**. Porto Alegre: UFRGS, 1982.

BS-7910, B. S. **Guide to Methods for Assessing the Acceptability of flaws in Metallic Structures**, 2005.

CALLISTER, W. D. J. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. Sétima. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2007.

CITISYSTEMS. <http://www.citisystems.com.br/diagrama-de-causa-e-efeito-ishikawa-espinha-peixe/>, 2012. Acesso em: 05 ago. 2013.

FLAMAN, M. T. Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Center-hole Method of Residual-stress Measurement, Toronto, p. 26-30, Janeiro 1982.

GRANT, P. V.; LORD, J. D.; WHITEHEAD, P. S. The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique. **National Physical Laboratory**, Middlesex, Agosto 2002.

GUM. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Rio de Janeiro, 2003.

HAUK, V. **Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods**. Aachen: Elsevier, 1997.

HE, B. B. **Two-Dimensional X-Ray Diffraction**. New Jersey, 2009.

HOFFMANN, K. An Introduction to Measurements Using Strain Gages. **Hottinger Baldwing Messtechnik GmbH**, Darmstadt, 1989.

HOLY, S. et al. Experimental Calibration of Constants Used for Determining Residual Stresses from Hole Drilling Method Data. In: TRENCÍN, A. D. U. O. **University Review - Material Engineering**, v. 1, 2007. p. 49 - 57.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)**. Rio de Janeiro, 2008.

INMETRO; ABNT. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição - ISO GUM**. Rio de Janeiro, 2003.

JCGM. **Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement - GUM**. Paris, 2008.

LEGENDRE, L. Guidelines for the estimation of uncertainty for a series of tests. In: MANUAL, U. **Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials**. Paris, 2000.

LIN, Y. C.; CHOU, C. P. Error Induced by Local Yielding Around Hole in Hole Drilling Method for Measuring Residual Stress of Materials. **Materials Science and Technology**, v. 11, p. 600-604, June 1995.

LONDINI, A. Calculation of residual stress from measured strain. In: FITZPATRICK, M. E.; LONDINI, A. **Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation**. London: Taylor & Francis Group, 2003. Cap. 2, p. 48.

LU, J. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**. Fairmont Press, 1996.

LU, J. Prestress Engineering of Structural Material: A Global Design Approach to the Residual Stress Problem. In: TOTTEN, G.; HOWES, M.; INOUE, T. **Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel**. Lasmis: Copyright, 2002. p. 11-26.

MARTINS, C. O. D. **Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis para Rolamentos**. Porto Alegre: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2004.

METROLÓGICA, R. **Incerteza de Medição: Guia Prático do Avaliador de Laboratórios**. Porto Alegre, 2009.

NIKU-LARA, A.; LU, J.; FLAVENOT, J. F. Measurement of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole-Drilling Method. **Journal of Mechanical Working Technology**, Amsterdam, 1985. 167-188.

PIZZOLATO, M. **Mapeamento da Estrutura Global que Fornece Confiança às Medições: Análise da Inserção Brasileira**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2006.

PREVÉY, P. S. X-ray Diffraction Residual Stress Techniques. In: PREVÉY, P. S. **ASM Metals Handbook**. Ohio: ASM International, 1986. p. 380-392.

RENDLER, N. J.; VIGNESS, I. Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses. **Experimental Mechanics**, Detroit, December 1966. 577-586.

ROSSINI, N. S. et al. Methods of Measuring Residual Stresses in Components. **Materials & Design**, 2012. 572-588.

RS, R. M. **Incerteza de Medição: Guia Prático do Avaliador de Laboratórios**. Rede Metrológica RS. Porto Alegre. 2009.

SCHAJER, G. S. **Practical Residual Stress Measurement Methods**. Primeira. ed. Vancouver: Wiley, 2013.

SCHWARZ, T.; KOCKELMANN, H. Die Bohrlochmethode - ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen. **MTB**, Stuttgart, 1993. 33-38.

SILVA JÚNIOR, S. F. D.; MANSUR, T. R.; PALMA, E. S. **Determinação de Tensões Residuais em Materiais Ferromagnéticos pelo Efeito Barkhausen**. Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. 1999. p. 5 - 8.

SOARES, M. D. C. B. V. **Influência das Tensões Residuais no Comportamento em Fadiga e Fratura de Ligas Metálicas**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1998.

SOBOLEVSKI, E. G. **Residual Stress Analysis of Components with Real Geometries Using the Incremental Hole-Drilling Technique and a Differential Evaluation Method**. Kassel: Universität Kassel, 2007.

WITHERS, P. J.; BHADESHIA, H. K. D. H. Residual stress: Part 1 - Measurement techniques. **Materials Science and Technology**, April 2001. 355-364.

APÊNDICE A – EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM UM TRABALHO PRÁTICO

Como exemplo de aplicação das planilhas de cálculo de incerteza de medição desenvolvidas nesse trabalho, as mesmas foram utilizadas para análise dos resultados obtidos pelo MFC em quatro amostras. Essas amostras são componentes que foram submetidos ao processo de *shot-peening* para introdução de tensões residuais compressivas na superfície. O sucesso do processo depende principalmente da magnitude das tensões residuais compressivas introduzidas no material e da profundidade da camada compressiva.

Os resultados de tensões residuais são apresentados em forma de gráficos das tensões residuais máximas e mínimas principais da Figura 45 a Figura 48 para as quatro amostras.

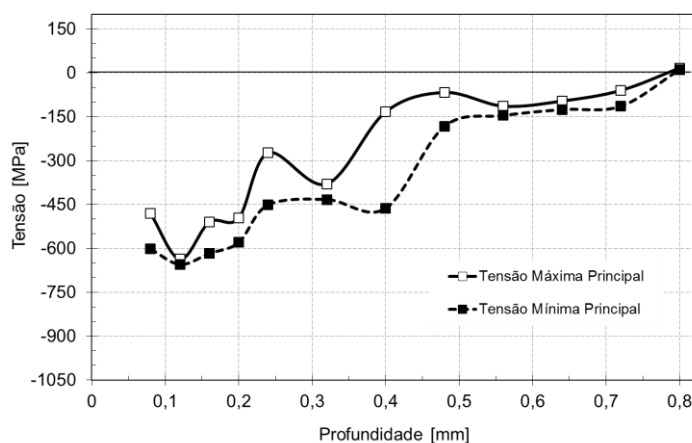


Figura 45: Perfis de tensões residuais a partir da superfície para a Amostra 120_12_1.

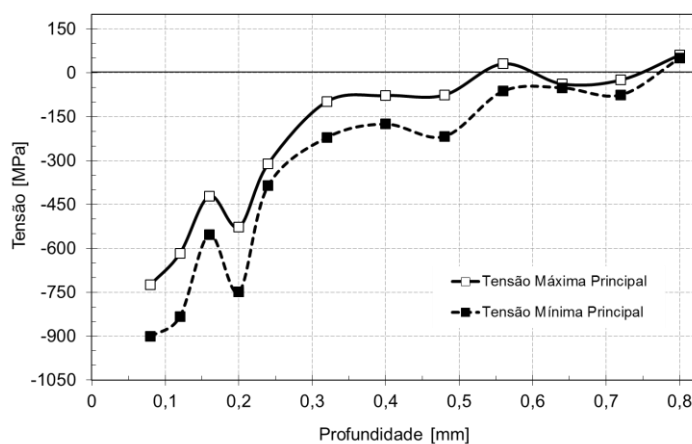


Figura 46: Perfis de tensões residuais a partir da superfície para a Amostra 120_12_2.

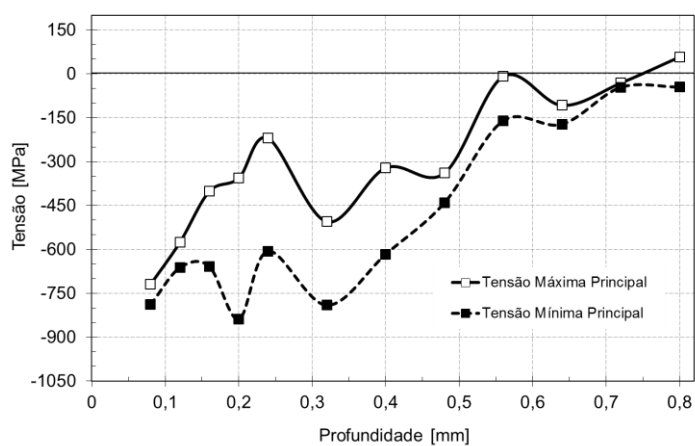


Figura 47: Perfis de tensões residuais a partir da superfície para a Amostra 120_12_3.

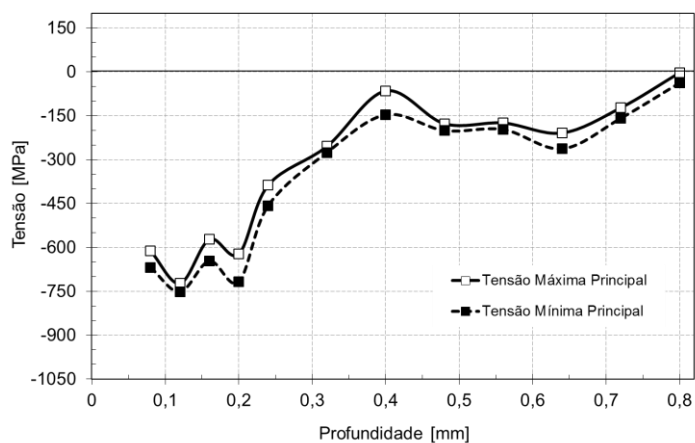


Figura 48: Perfis de tensões residuais a partir da superfície para a Amostra 120_12_4.

A incerteza de medição referente ao ponto de medição das tensões residuais pelo método do furo cego em cada amostra é:

120_12_1 = $\pm 52,2$ MPa

120_12_2 = $\pm 72,8$ MPa

120_12_3 = $\pm 61,9$ MPa

120_12_4 = $\pm 40,1$ MPa