

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FÁBIO JUNKES CORRÊA

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO PERFIL  
DE TENSÕES RESIDUAIS COM O USO DO MÉTODO DO FURO CEGO E DE  
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

CURITIBA

2020

FÁBIO JUNKES CORRÊA

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO PERFIL  
DE TENSÕES RESIDUAIS COM O USO DO MÉTODO DO FURO CEGO E DE  
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração em Mecânica dos Sólidos e Vibrações, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jucélio Tomás Pereira.

CURITIBA

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

---

C824d

Corrêa, Fábio Junkes

Desenvolvimento de uma metodologia para obtenção do perfil de tensões residuais com o uso do método do furo cego e de técnicas de otimização [recurso eletrônico]/ Fábio Junkes Corrêa - Curitiba, 2020.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração em Mecânica dos Sólidos e Vibrações, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Jucélio Tomás Pereira.

1. Engenharia mecânica. 2. Método do furo cego. I. Pereira, Jucélio Tomás. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 620.1

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **FÁBIO JUNKES CORRÊA** intitulada: **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS COM O USO DO MÉTODO DO FURO CEGO E DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. JUCÉLIO TOMÁS PEREIRA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Outubro de 2020.



JUCÉLIO TOMÁS PEREIRA  
Presidente da Banca Examinadora



SHEILA REGINA ORO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)



MARCO ANTONIO LUERSEN  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)



RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jucélio Tomás Pereira pela orientação, pelo exemplo de profissionalismo, amizade e apoio no decorrer deste trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Marco Antônio Luersen, Profa. Dr. Sheila Regina Oro e Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes, por contribuírem com a melhoria deste trabalho.

Ao meu pai, João de Souza Corrêa, e minha mãe, Graziela Junkes Corrêa, pelo apoio, companheirismo e transmissão de valores e caráter.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Bavastri, por todo apoio que me ofereceu durante esses anos do doutorado.

Aos meus colegas e a todo o grupo dos laboratórios de Vibrações e de Mecânica dos Sólidos Computacional da UFPR, pelo apoio e motivação ao longo desse período.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PGMEC) da UFPR e à UTFPR por propiciar as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Vilmar Steffen da UTFPR-FB por ter me substituído durante o afastamento para cursar as disciplinas obrigatórias do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por possibilitar, através de apoio financeiro, a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e aos seus colaboradores, em especial ao Prof. Carlo Giuseppe Filippin, por gentilmente ceder os equipamentos e um espaço no laboratório para a realização dos ensaios experimentais.

Ao Eng. Claiton Mattos pelo apoio nos experimentos físicos realizados no LACTEC.

A todas as pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

## RESUMO

As tensões residuais (TR) presentes em componentes mecânicos, estruturas e tubulações podem ser favoráveis ou prejudiciais, dependendo de sua magnitude, da forma e do local em que estiver presente. A previsão das TR indesejáveis pode evitar danos aos materiais. Assim, este trabalho tem como motivação prevenir que os materiais sofram falhas devido à TR com níveis significativos, as quais podem comprometer a sua resistência. Dentre os métodos semi-destrutivos para obtenção de TR, a técnica do furo cego agrega diversos benefícios como mobilidade do equipamento, possibilidade de aplicação em diversos materiais, praticidade em medir o alívio das deformações e baixo custo de execução. Conforme consta na norma ASTM E 837-13, o perfil de TR ao longo da espessura de uma peça pode ser aproximado por um conjunto de valores constantes em cada camada. Cada uma dessas camadas corresponde a um incremento de perfuração. Na metodologia proposta, com o intuito de obter um perfil de TR contínuo, um pequeno elemento de volume contendo a região de instalação da roseta é modelado pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Considerando que o perfil de TR real não é conhecido, é construída uma aproximação composta por perfis de tensões induzidos devido à aplicação de carregamentos externos, definidos por funções unitárias, similar às funções de forma lineares. Definem-se fatores que são multiplicados pelos perfis de tensões, obtidos por MEF, com o propósito de aproximar ao perfil real de TR. Esses fatores podem ser associados às deformações obtidas via MEF através de uma combinação linear. Nesse modelo de elementos finitos, são aplicados carregamentos nas faces externas do elemento sólido e efetuados os furos no centro da sua superfície. Com isso, as deformações obtidas pelo modelo, na região de instalação dos extensômetros, são confrontadas com as deformações lidas nos extensômetros físicos. Na parte experimental, um dispositivo mecânico é construído, com o propósito de gerar um perfil linear de tensões devido à flexão de uma viga. Com a viga flexionada, as deformações relaxadas são lidas pelos extensômetros à medida que as perfurações incrementais são executadas. Antes de introduzir as deformações físicas no modelo, são aplicados métodos estatísticos, que avaliam como as respostas experimentais variam, permitindo analisar a sua variabilidade. Com as análises estatísticas processadas, são selecionados dados experimentais, conforme os critérios pré-estabelecidos. A diferença entre as deformações obtidas via MEF e as obtidas através de experimentos físicos gera um erro. Através de um método de otimização híbrida, combinando Algoritmos Genéticos e Programação Não-Linear, esse erro é minimizado com o propósito de encontrar os fatores, os quais possibilitam construir o perfil de TR. Os resultados dos perfis de TR obtidos com a metodologia proposta foram comparados com os resultados obtidos devido à aplicação método do furo cego modificado. Notou-se que as TR das curvas selecionadas ficaram muito próximas às tensões analíticas. Enquanto que no método do furo cego modificado, geralmente, o perfil de TR apresenta descontinuidades nas interfaces das camadas, na metodologia apresentada neste trabalho, o perfil de TR varia continuamente ao longo da profundidade do componente.

Palavras-chave: métodos semi-destrutivos, Método dos Elementos Finitos, funções de forma, otimização híbrida.

## ABSTRACT

Residual stresses (RT) in mechanical components can be beneficial or harmful, depending on their magnitude, shape and location. Predicting undesirable RT can avoid flaws to materials. Thus, this work is motivated to prevent that the materials can flaw due to RT with high levels, which can implicate their mechanical resistance. Among the semi-destructive methods for RT determining, the blind hole technique aggregate many benefits as the equipment mobility, application possibility in different materials, practicality in strain relief measuring and low perform cost. As stated in the standard, the RT profile along the part thickness can be approximated by a constant value set in each layer. Each of these layers corresponds to a drilling increment. In the proposed methodology, in order to determine a continuous RT profile, a small volume element containing the rosette installation region is modeled by the Finite Element Method (FEM). Considering that the real RT profile is not known, it's built an approximation composed by induced stress profiles due to the external loads' application defined by unitary functions, similar to the linearly shaped functions. Factors are defined and multiplied by the RT profiles obtained by FEM, in order to approximate the real RT profile. These factors can be associated to the strains obtained by FEM through a linear combination. In this finite element model, the loads are applied in the solid element external faces and the holes are drilled in the its surface center. Thus, the strains obtained by the model in the extensometer's installation region are compared with the strains measure in the physical extensometers. In the experimental section, a mechanical apparatus is built, with the purpose generating a linear stress profile due to a beam bending. With the beam bending, relaxed strains are measure by the strain gauges as incremental drilling is performed. Before introducing the physical strains in the model, statistical methods are applied, which evaluate how the experimental responses vary, allowing to analyze their variability. With the processed statistical analysis, experimental data are selected, according to the established criteria. The difference between the strains obtained through the FEM and those obtained through physical experiments generate an error. Through a hybrid optimization method, combining Genetic Algorithm and Nonlinear Programming, this error is minimized in order to find the factors, which make possible to build the RT profile. The RT profiles results obtained with the proposed methodology were compared with the results obtained due to the modified blind hole method application. It was noted that the selected curves were very close to the analytical stresses. While that in the modified blind hole method, generally, the TR profile shows discontinuities in the layers' interfaces, in the methodology presented in this work, the RT profile vary continuously along the component depth.

**Keywords:** semi-destructive methods, Finite Element Method, shape functions, hybrid optimization.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ETAPAS DO MÉTODO DO CONTORNO: (A) PREVISÃO TEÓRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES, (B) EXECUÇÃO DO CORTE E (C) REPRODUÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS COM BASE NAS DISTORÇÕES SUPERFICIAIS.....	37
FIGURA 2 - MÉTODO SANCHS-BORING: (A) ANTES E (B) DEPOIS DE MANDRILAR.....	38
FIGURA 3 - MÉTODO DO CORTE.....	38
FIGURA 4 - ETAPAS DO MÉTODO DO FURO PROFUNDO.....	40
FIGURA 5 - MÉTODO DO NÚCLEO TOROIDAL.....	41
FIGURA 6 - MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS DESTACANDO AS REGIÕES DE INSTALAÇÕES DOS EXTENSÔMETROS E DE REALIZAÇÃO DOS FUROS NO MÉTODO DO FURO CEGO.....	41
FIGURA 7 - FURO COM DOIS DOIS PONTOS DE MEDIÇÃO.....	42
FIGURA 8 - AMOSTRA DE UMA PLACA COM TRÊS EXTENSÔMETROS EM TORNO DE UM FURO.....	43
FIGURA 9 - EXTENSÔMETROS ESPAÇADOS EM 45°.....	43
FIGURA 10 - ROSETAS: (A) TIPO A (B) TIPO B.....	44
FIGURA 11 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS: (A) UNIFORMES E (B) NÃO UNIFORMES.....	44
FIGURA 12 - ROSETA MODIFICADA COMPOSTA POR TRÊS PARES DE EXTENSÔMETROS.....	45
FIGURA 13 - ROSETA UTILIZADA NO MÉTODO DO FURO CEGO.....	46
FIGURA 14 - A FUNÇÃO CONTÍNUA DESCONHECIDA TEÓRICA.....	51
FIGURA 15 - FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO PARA SEGMENTOS LINEARES... ..	51
FIGURA 16 - FUNÇÕES LINEARES DE INTERPOLAÇÃO.....	52
FIGURA 17 - FUNÇÕES DE FORMA LINEARES.....	53
FIGURA 18 - FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL.....	64
FIGURA 19 - VALORES AJUSTADOS EM FUNÇÃO DOS RESÍDUOS: (A) INDEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS (B) DEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS.....	65
FIGURA 20 - CAMPO GENÉRICO DE TENSÕES RESIDUAIS.....	68

FIGURA 21 - CARREGAMENTOS DEFINIDOS POR FUNÇÕES DE FORMA: (A) FUNÇÃO $\psi_{d1}(z)$ , (B) FUNÇÃO $\psi_{d2}(z)$ , (C) FUNÇÃO $\psi_{dn-1}(z)$ E (D) FUNÇÃO $\psi_{dn}(z)$ .....	68
FIGURA 22 - PERFIL DE TENSÃO $\Sigma_{r1}(z)$ (B) INDUZIDO PELO PRIMEIRO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA $\Psi_{d1}(z)$ (A). ....	69
FIGURA 23 - PERFIL DE TENSÃO $\Sigma_{r2}(z)$ (B) INDUZIDO PELO SEGUNDO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA $\Psi_{d2}(z)$ (A). ....	69
FIGURA 24 - PERFIL DE TENSÃO $\Sigma_{rn-1}(z)$ (B) INDUZIDO PELO PENÚLTIMO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA $\Psi_{dn-1}(z)$ (A).....	69
FIGURA 25 - PERFIL DE TENSÃO $\Sigma_{rn}(z)$ (B) INDUZIDO PELO ÚLTIMO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA $\Psi_{dn}(z)$ (A). ....	70
FIGURA 26 - SUPERPOSIÇÃO DOS CARREGAMENTOS COM OS FATORES MULTIPLICADORES INTRODUZIDOS. (A) PRIMEIRO. (B) SEGUNDO. (C) PENÚLTIMO. (D) ÚLTIMO. (E) PERFIL RESULTANTE DA SUPERPOSIÇÃO DOS CARREGAMENTOS. ....	71
FIGURA 27 - REPRESENTAÇÃO DAS PERFURAÇÕES INCREMENTAIS $h_j$ .....	72
FIGURA 28 - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS. ....	73
FIGURA 29 – DIMENSÕES DAS REGIÕES DO MODELO ONDE É INSTALADA A ROSETA E REALIZADOS OS FUROS. ....	74
FIGURA 30 - SIMULAÇÃO DAS PERFURAÇÕES INCREMENTAIS. (A) PRIMEIRO INCREMENTO. (B) SEGUNDA INCREMENTO. (C) TERCEIRO INCREMENTO. ...	74
FIGURA 31 - POSIÇÕES DOS ÂNGULOS.....	76
FIGURA 32 - TENSÕES RESIDUAIS BASEADAS EM FUNÇÕES DE FORMA APLICADAS NA DIREÇÃO X PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.....	78
FIGURA 33 - TENSÕES RESIDUAIS BASEADAS EM FUNÇÕES DE FORMA APLICADAS NA DIREÇÃO Y PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.....	79
FIGURA 34 - TENSÕES RESIDUAIS BASEADAS EM FUNÇÕES DE FORMA APLICADAS NO PLANO XY PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.....	80

FIGURA 35 - SUPERPOSIÇÃO DAS TENSÕES NAS DIREÇÕES X E Y E NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X E Y PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.....	82
FIGURA 36 - SUPORTE PARA FIXAR OS CORPOS. ....	85
FIGURA 37 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NOS ENSAIOS. ....	86
FIGURA 38 - FORNO RESISTIVO.....	87
FIGURA 39 - BALANÇA DE PESAGEM DIGITAL. ....	87
FIGURA 40 - PAQUÍMETRO DIGITAL.....	87
FIGURA 41 - GONIÔMETRO.....	88
FIGURA 42 - ÁLCOOL ISOPROPÍLICO. ....	88
FIGURA 43 - ADESIVO INSTANTÂNEO. ....	89
FIGURA 44 - ROSETA DO TIPO B.....	89
FIGURA 45 - SUPORTE PARA FIXAR A FURADEIRA. ....	90
FIGURA 46 - LUPA PARA CENTRAGEM.....	90
FIGURA 47 - CENTRAGEM DO POSICIONAMENTO DO FURO. ....	90
FIGURA 48 - FURADEIRA PNEUMÁTICA.....	91
FIGURA 49 - BROCA.....	91
FIGURA 50 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS. ....	92
FIGURA 51 - PÁGINA FRONTAL DO PROGRAMA <i>LABVIEW</i> . ....	92
FIGURA 52 - EXPERIMENTAÇÃO. (A) CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS. (B) VISUALIZAÇÃO MAIS PRÓXIMA.....	93
FIGURA 53 - PROTÓTIPO PARA SIMULAR FISICAMENTE A FLEXÃO DE UMA VIGA.....	94
FIGURA 54 - DISTÂNCIAS DAS LINHAS ONDE AS ROSETAS SÃO ANEXADAS. ....	94
FIGURA 55 - CONFIGURAÇÕES DE INSTALAÇÃO DAS ROSETAS DO TIPO B. (A) ROSETA SEM ROTAÇÃO. (B) ROSETA COM ROTAÇÃO DE 15° NO SENTIDO HORÁRIO.....	95
FIGURA 56 – DPR’S MÉDIOS DOS QUATRO TRATAMENTOS PARA CADA EXTENSÔMETRO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE .....	102
FIGURA 57 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO X' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO X' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO X' PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	104

FIGURA 58 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO Y' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO Y' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO Y' PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	105
FIGURA 59 - PERFIL DE TENSÕES CISALHANTES NO PLANO XY' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NO PLANO XY' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO XY' PARA O CASO 1 (CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA).....	105
FIGURA 60 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 1. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	106
FIGURA 61 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 1. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	106
FIGURA 62 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO X' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO X' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO X' PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	108
FIGURA 63 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO Y' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO Y' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO Y' PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	108
FIGURA 64 - PERFIL DE TENSÕES CISALHANTES NO PLANO XY' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO XY' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO XY' PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	109
FIGURA 65 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 2 (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	110

FIGURA 66 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 2. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	110
FIGURA 67 - PERFIL DE TENSÕES: (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO X' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO X' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA. ....	111
FIGURA 68 - PERFIL DE TENSÕES: (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO Y' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO Y' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA. ....	112
FIGURA 69 - PERFIL DE TENSÕES: (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO XY' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO XY' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA. ....	112
FIGURA 70 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	113
FIGURA 71 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	113
FIGURA 72 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO X' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO X' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO X' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA. ....	115
FIGURA 73 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO Y' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO Y' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO Y' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA. ....	115
FIGURA 74 - PERFIL DE TENSÕES CISALHANTES NO PLANO XY' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS	

CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO XY' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO XY' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA. ....	116
FIGURA 75 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	116
FIGURA 76 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	117
FIGURA 77 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 2. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	119
FIGURA 78 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 2. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	120
FIGURA 79 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 3. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	121
FIGURA 80 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 3. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	121
FIGURA 81 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 4. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	122
FIGURA 82 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 4. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS. ....	122
FIGURA 83 - DECOMPOSIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MEDIDAS EM J = 3. ....	139
FIGURA 84 - INTERPRETAÇÃO DA APLICAÇÃO DAS TENSÕES UNITÁRIAS NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA NORMAL. ....	148
FIGURA 85 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NORMAL NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA TRANSVERSAL. ....	150
FIGURA 86 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NORMAL NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA TRANSVERSAL. ....	151
FIGURA 87 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DE CISALHAMENTO NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA TRANSVERSAL. ....	151

FIGURA 88 – DIAGRAMAS PARA ANÁLISES DAS INDEPENDÊNCIAS DOS RESÍDUOS.....	176
FIGURA 89 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	184
FIGURA 90 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.	184
FIGURA 91 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	185
FIGURA 92 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.	185
FIGURA 93 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	186
FIGURA 94 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.	186
FIGURA 95 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	187
FIGURA 96 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.	187
FIGURA 97 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	188
FIGURA 98 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.	188

FIGURA 99 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	189
FIGURA 100 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.	189
FIGURA 101 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	190
FIGURA 102 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.	190
FIGURA 103 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	191
FIGURA 104 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.	191
FIGURA 105 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	192
FIGURA 106 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.	192
FIGURA 107 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	193
FIGURA 108 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.	193
FIGURA 109 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	194

FIGURA 110 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	194
FIGURA 111 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	195
FIGURA 112 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	195
FIGURA 113 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	196
FIGURA 114 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	196
FIGURA 115 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	197
FIGURA 116 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	197
FIGURA 117 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	198
FIGURA 118 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	198
FIGURA 119 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	199
FIGURA 120 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	199

FIGURA 121 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	200
FIGURA 122 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	200
FIGURA 123 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	201
FIGURA 124 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	201
FIGURA 125 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	202
FIGURA 126 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	202
FIGURA 127 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	203
FIGURA 128 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	203

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - REPRESENTAÇÃO DO CRUZAMENTO.....	57
TABELA 2 - REPRESENTAÇÃO DO OPERADOR DE MUTAÇÃO.....	57
TABELA 3 - ARRANJO DOS DADOS PARA UM PLANEJAMENTO FATORIAL SIMPLES.....	61
TABELA 4 - QUADRO DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA).....	62
TABELA 5 - PROPRIEDADES DA MALHA CONSTRUÍDA.....	73
TABELA 6 - CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	73
TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ALUMÍNIO AA-6063.....	86
TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 1025.....	86
TABELA 9 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS DAS TENSÕES NORMAIS CONFORME AS ESPESSURAS E AS DISTÂNCIAS DAS LINHAS DE MEDIÇÃO.....	95
TABELA 10 - CASOS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS FÍSICOS.....	96
TABELA 11 - ANÁLISE ISOLADA PARA CADA CASO DA NORMALIDADE DOS RESÍDUOS.....	99
TABELA 12 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 1: CORPO DE ALUMÍNIO AA- 6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	101
TABELA 13 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 2: CORPO DE ALUMÍNIO AA- 6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	101
TABELA 14 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 3: CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	101
TABELA 15 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 4: CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	101
TABELA 16 - FATORES OBTIDOS PELO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	103
TABELA 17 - FATORES OBTIDOS A PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	107
TABELA 18 - FATORES OBTIDOS A PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	111

TABELA 19 - FATORES OBTIDOS A PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	114
TABELA 20 - RESULTADOS DO RMSE .....	117
TABELA 21 - ARRANJO DOS DADOS PARA UM PLANEJAMENTO FATORIAL COM 2 FATORES .....	154
TABELA 22 - QUADRO DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA).....	155
TABELA 23 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	160
TABELA 24 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	160
TABELA 25 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	161
TABELA 26 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	161
TABELA 27 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.....	161
TABELA 28 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	162
TABELA 29 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	162
TABELA 30 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	163
TABELA 31 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	163
TABELA 32 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.....	164
TABELA 33 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA .....	164
TABELA 34 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA .....	165
TABELA 35 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA .....	165

TABELA 36 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA .....	165
TABELA 37 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA .....	166
TABELA 38 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA .....	166
TABELA 39 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA .....	167
TABELA 40 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA .....	167
TABELA 41 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA .....	168
TABELA 42 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA .....	168
TABELA 43 - RESULTADOS DA ANOVA.....	169
TABELA 44 - RESULTADOS DAS COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS ENTRE AS MÉDIAS .....	170
TABELA 45 - RESULTADOS DAS INTERAÇÕES ENTRE OS FATORES.....	173
TABELA 46 - HOMOGENEIDADE DAS VARIÂNCIAS .....	174
TABELA 47 - AVALIAÇÃO DA NORMALIDADE DOS RESÍDUOS VIA TESTE DE SHAPIRO-WILK .....	175
TABELA 48 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 1 .....	180
TABELA 49 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 1 .....	180
TABELA 50 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 2 .....	180
TABELA 51 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 2 .....	181
TABELA 52 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 3 .....	181
TABELA 53 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 3 .....	182
TABELA 54 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 4 .....	182
TABELA 55 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 4 .....	183

## LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmos Genéticos.
ANOVA	Análise da Variância.
ASTM	Sociedade Americana para Teste de Materiais.
CID	Correlação de Imagem Digital.
CST	Corrosão sob tensão
IDPS	Interferometria Digital de Padrões de <i>Speckle</i> .
QME	Quadrado Médio dos Tratamentos.
QMR	Quadrado Médio dos Resíduos.
MEF	Método dos Elementos Finitos.
MSE	Erro quadrático médio.
PNL	Programação Não-Linear.
RMSE	Raiz do erro quadrático médio.
SF	Série de Fourier.
SQE	Soma dos Quadrados dos Tratamentos.
SQR	Soma dos Quadrados dos Resíduos.
SQT	Soma dos Quadrados Totais.
TEL	Teoria da Elasticidade Linear.
TR	Tensões Residuais.

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Alfabeto Latino

$a_0$	Constante inicial independente que compõe a Série de Fourier.
$a_n$	Constante n-ésima associada à função cosseno que compõe a Série de Fourier.
$a$	Constante de calibração para tensões isotrópicas.
$a_{jk}$	Componente jk-ésima da matriz de calibração para tensões isotrópicas.
$A_{jk}$	Componente jk-ésima componentes da matriz de calibração vinculadas às tensões normais.
$b_n$	Constante n-ésima associada à função seno que compõe a Série de Fourier.
$b$	Constante de calibração para tensões de cisalhamento.
$b_{jk}$	Componente jk-ésima da matriz de calibração para tensões de cisalhamento.
$B_{jk}$	Componente jk-ésima componentes da matriz de calibração vinculadas às tensões de cisalhamento.
$D$	Diâmetro do círculo que passa pelos centros dos extensômetros.
$D_o$	Diâmetro do furo executado.
$e_{ij}'$	Componentes da matriz de transformação em notação tensorial.
$e_j$	Deformações medidas na superfície no j-ésimo passo de profundidade de furação.
$e_x$	Deformação longitudinal na direção x.
$e_x'$	Deformação longitudinal na direção x'.
$e_y$	Deformação longitudinal na direção y.
$e_y'$	Deformação longitudinal na direção y'.
$e_{xy}$	Deformação de cisalhamento entre as direções x e y.
$e(\mathbf{T}_D)_j$	Erro quadrático para o j-ésimo furo.
$E(\mathbf{T}_D)$	Erro quadrático total.
$E$	Módulo de Young.
$E_T$	Módulo tangente no regime elástico-plástico.
$f(\theta)$	Função periódica qualquer, composta por senos e cossenos.

$f_e$	Fator de plasticidade adimensional.
$g_i$	i-ésima função de restrições de desigualdade.
$h_i$	i-ésima função de restrições de igualdade.
$h_j$	j-ésima profundidade do furo.
$\mathbf{h}$	Vetor contendo as profundidades de perfuração.
$H_0$	Hipótese nula.
$H_1$	Hipótese alternativa.
$p$	Deformação uniforme isotrópica.
$p_j$	Deformação isotrópica após o passo de profundidade do j-ésimo furo.
$p_{misfit}$	Desajuste (diferença) da variável $p$ .
$p_{rms}$	Valor do quadrado médio de $p_{misfit}$ .
$p_{std}$	Desvio padrão referente à variável $p$ .
$P$	Tensão uniforme biaxial isotrópica.
$P_j$	Tensão biaxial isotrópica dentro do passo de profundidade do j-ésimo furo.
$q$	Deformação uniforme calculada devido à diferença entre as deformações longitudinais nas direções $x$ e $y$ .
$q_j$	Deformação de cisalhamento após o passo de profundidade do j-ésimo furo.
$q_{misfit}$	Desajuste (diferença) da variável $q$ .
$q_{rms}$	Valor do quadrado médio de $q_{misfit}$ .
$q_{std}$	Desvio padrão referente à variável $q$ .
$Q$	Tensão uniforme calculada devido à diferença entre as tensões normais nas direções $x$ e $y$ .
$Q_j$	Tensão de cisalhamento dentro do passo de profundidade do j-ésimo furo.
$r_2$	Raio externo da roseta.
$r_1$	Raio interno da roseta.
$R$	Matriz de rotação.
$R^{nvp}$	Conjunto no espaço Euclidiano com $nvp$ variáveis de projeto.
$t$	Deformação uniforme de cisalhamento $xy$ .

$t_j$	Deformação de cisalhamento xy após o passo de profundidade do j-ésimo furo.
$T$	Tensão uniforme de cisalhamento xy.
$T_j$	Tensão cisalhante xy após o passo de profundidade do j-ésimo furo.
$T_{d_i}$	Fator amplificador do perfil de tensões para o i-ésimo carregamento.
$\mathbf{T}_d$	Vetor composto pelos elementos $T_{d_i}$ .
$t_{misfit}$	Desajuste (diferença) da variável t.
$t_{rms}$	Valor do quadrado médio de $t_{misfit}$ .
$t_{std}$	Desvio padrão referente à variável t.
$T_{x_i}$	Fator correspondente ao i-ésimo carregamento na direção x.
$\mathbf{T}_x$	Vetor composto pelos elementos $T_{x_i}$ .
$T_{y_i}$	Fator correspondente ao i-ésimo carregamento na direção y.
$\mathbf{T}_y$	Vetor composto pelos elementos $T_{y_i}$ .
$T_{xy_i}$	Fator correspondente ao i-ésimo carregamento cisalhante no plano xy.
$\mathbf{T}_{xy}$	Vetor composto pelos elementos $T_{xy_i}$ .
$Tx_{inf}$	Limite inferior para os fatores correspondentes aos carregamentos na direção x.
$Tx_{sup}$	Limite superior para os fatores correspondentes aos carregamentos na direção x.
$Ty_{inf}$	Limite inferior para os fatores correspondentes aos carregamentos na direção y.
$Ty_{sup}$	Limite superior para os fatores correspondentes aos carregamentos na direção y.
$Txy_{inf}$	Limite inferior para os fatores correspondentes aos carregamentos no plano xy.
$Txy_{sup}$	Limite superior para os fatores correspondentes aos carregamentos no plano xy.
$u$	Função contínua desconhecida.
$\hat{u}^e$	Polinômio de interpolação de Lagrange para um e-ésimo elemento.
$u_j^e$	Valor nodal no i-ésimo nó do e-ésimo elemento.
$U_{ij}$	Deslocamento na direção radial na região de medição para o i-ésimo incremento de perfuração e o j-ésimo nível de profundidade.

$x$	Vetor de variáveis de projeto.
$x^*$	Ponto ótimo no problema de otimização.
$\chi^2$	Estatística de teste para o teste de Bartlett.
$y_{ij}$	Variável aleatória de saída considerando o $i$ -ésimo tratamento e a $j$ -ésima unidade experimental.
$y_i.$	total das observações obtidas no $i$ -ésimo tratamento.
$\bar{y}_i.$	média correspondente de cada tratamento.
$y_{..}$	valor total global de todas as observações.
$\bar{y}_{..}$	média global correspondente de todas as observações.
$w$	Estatística de teste para o teste de Shapiro-Wilk.

## Alfabeto Grego

$\alpha$	Índice de significância.
$\alpha_j$	j-ésimo coeficiente angular da função de aproximação.
$\alpha_P$	Fator de regularização para tensão biaxial.
$(\alpha_P)_{new}$	Nova suposição do fator de regularização para tensão biaxial.
$(\alpha_P)_{old}$	Suposição atual do fator de regularização para tensão biaxial.
$\alpha_Q$	Fator de regularização para tensão de cisalhamento.
$(\alpha_Q)_{new}$	Nova suposição do fator de regularização para tensão de cisalhamento.
$(\alpha_Q)_{old}$	Suposição atual do fator de regularização para tensão de cisalhamento.
$\alpha_T$	Fator de regularização para tensão de cisalhamento xy.
$(\alpha_T)_{new}$	Nova suposição do fator de regularização para tensão de cisalhamento xy.
$(\alpha_T)_{old}$	Suposição atual do fator de regularização para tensão de cisalhamento xy.
$\beta_j$	j-ésimo coeficiente da função de aproximação.
$\beta$	Ângulo de tensão máxima.
$\nu$	Coefficiente de Poisson.
$\varepsilon_A$	Deformação longitudinal na direção radial lida pelo extensômetro A.
$\varepsilon_B$	Deformação longitudinal na direção radial lida pelo extensômetro B.
$\varepsilon_C$	Deformação longitudinal na direção radial lida pelo extensômetro C.
$\varepsilon_d(\theta)$	Função de deformação composta por senos e cossenos para carregamentos na direção d.
$\varepsilon_d^{EXP}(\theta)$	Função de deformação composta por senos e cossenos obtidos por experimentos físicos para carregamentos na direção d.
$\varepsilon_d^{MEF}(\theta)$	Função de deformação composta por senos e cossenos obtidos pelo Método dos Elementos Finitos para carregamentos na direção d.
$\varepsilon_x$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , oriunda da aplicação do carregamento na direção x.
$\varepsilon_{xi}$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , para a i-ésima camada oriunda da aplicação do carregamento na direção x.

$\varepsilon_x^{MEF}$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , oriunda da aplicação do carregamento na direção x através do MEF.
$\varepsilon_y$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , oriunda da aplicação do carregamento na direção y.
$\varepsilon_{y_i}$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , para a i-ésima camada oriunda da aplicação do carregamento na direção y.
$\varepsilon_y^{MEF}$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , oriunda da aplicação do carregamento na direção y através do MEF.
$\varepsilon_{xy}$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , oriunda da aplicação do carregamento no plano xy.
$\varepsilon_{xy_i}$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , para a i-ésima camada oriunda da aplicação do carregamento no plano xy.
$\varepsilon_{xy}^{MEF}$	Deformação longitudinal na direção radial com uma orientação $\theta$ , oriunda da aplicação do carregamento no plano xy através do MEF.
$\varepsilon_{ij}$	Componente ij-ésima da deformação devido à aplicação da tensão radial.
$\sigma$	Desvio padrão.
$\sigma^2$	Variância.
$\sigma_{eq}$	Tensão residual equivalente.
$\sigma_{eq,e}$	Tensão equivalente de von Mises.
$\sigma_{ij}$	Componente ij-ésima da tensão radial aplicada na superfície interna do furo.
$\sigma_{r_i}$	Tensão residual decorrente do i-ésimo carregamento ao longo da profundidade na direção z.
$\sigma_r$	Vetor que compõe o campo de tensões residuais ao longo da profundidade na direção z.
$\sigma_{max}$	Tensão principal máxima.
$\sigma_{min}$	Tensão principal mínima.
$\sigma_{x_i}$	Tensão normal da i-ésima camada na direção x.
$\sigma_x$	Vetor que compõe o campo de tensões residuais na direção x.
$\sigma_{y_i}$	Tensão normal da i-ésima camada na direção y.
$\sigma_y$	Vetor que compõe o campo de tensões residuais na direção y.

$\tau_{xy_i}$	Tensão de cisalhamento entre as direções x e y.
$\tau_{xy}$	Tensão de cisalhamento entre as direções x e y.
$\sigma_Y$	Tensão de escoamento do material.
$\psi_j^e$	i-ésima função de forma de Lagrange para um e-ésimo elemento linear.
$\Psi_{d_j}$	i-ésima função de forma de Lagrange na direção d (x, y ou xy).

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>31</b>
1.1	OBJETIVOS .....	33
1.1.1	Objetivos Gerais .....	33
1.1.2	Objetivos Específicos .....	33
1.2	CONTRIBUIÇÕES .....	33
1.3	ESTRUTURA DO TEXTO .....	34
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>35</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	35
2.2	MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS .....	35
2.3	MÉTODOS DESTRUTIVOS .....	36
2.4	MÉTODOS SEMI-DESTRUTIVOS .....	39
2.5	MÉTODO DO FURO CEGO .....	42
2.6	ESTADO DA ARTE .....	46
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE APROXIMAÇÃO POR INTERPOLAÇÃO POLINOMIAL</b> .....	<b>50</b>
3.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS DE INTERPOLAÇÃO LINEAR .....	50
3.2	APROXIMAÇÃO LINEAR POR PARTES DE UMA FUNÇÃO CONTÍNUA .....	50
3.3	APROXIMAÇÃO COM FUNÇÕES LINEARES .....	51
3.4	FUNÇÕES DE FORMA LINEARES .....	52
<b>4</b>	<b>OTIMIZAÇÃO NÃO-LINEAR</b> .....	<b>54</b>
4.1	PRINCÍPIOS DE OTIMIZAÇÃO NÃO-LINEAR .....	54
4.2	OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMOS GENÉTICOS .....	55
4.2.1	Codificação Binária .....	56
4.2.2	Operadores Genéticos .....	56
4.2.3	Aplicação da AG em ambiente <i>Matlab</i> .....	57
4.3	PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR .....	57
4.3.1	Aplicação da PNL em ambiente <i>Matlab</i> .....	58
<b>5</b>	<b>ESTATÍSTICA APLICADA</b> .....	<b>59</b>
5.1	PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA .....	59
5.2	ANÁLISE DA VARIÂNCIA .....	60
5.3	ANÁLISE DE RESÍDUOS .....	62
5.3.1	Teste de homogeneidade das variâncias dos resíduos .....	63
5.3.2	Teste de normalidade dos resíduos .....	64
5.3.3	Teste de independência dos resíduos .....	65
5.4	RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO .....	65
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA PARA O CÁLCULO DO PERFIL DE TR</b> .....	<b>67</b>
6.1	IDEIA CENTRAL DA METODOLOGIA PROPOSTA .....	67
6.2	PROCEDIMENTO PARA CALCULAR AS TENSÕES CONTÍNUAS COM BASE EM CARREGAMENTOS DEFINIDOS POR FUNÇÕES DE FORMA	67
6.3	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS .....	72
6.4	APROXIMAÇÃO DA DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL NA DIREÇÃO RADIAL POR SÉRIE DE FOURIER .....	75
6.4.1	Deformações decorrentes do campo de tensões residuais na direção x .....	77
6.4.2	Deformações decorrente do campo de tensões residuais na direção y .....	79

6.4.3	Deformações decorrentes do campo de tensões residuais na direção xy....	80
6.4.4	Superposição das deformações devido aos campos de tensões residuais..	81
6.5	<b>OBTENÇÃO DO CAMPO DE TENSÕES RESIDUAIS VIA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>85</b>
7.1	MATERIAIS .....	85
7.2	MÉTODOS .....	93
<b>8</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>96</b>
8.1	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	96
8.1.1	Análise da Variância.....	96
8.1.2	Teste de homogeneidade das variâncias dos resíduos.....	97
8.1.3	Teste de normalidade dos resíduos.....	98
8.1.4	Teste para verificar a independência.....	100
8.1.5	Teste do desvio padrão relativo.....	100
8.2	ANÁLISE DA METODOLOGIA EMPREGADA PARA A CONSTRUÇÃO DO PERFIL DE TR .....	103
8.2.1	Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 1 ..	103
8.2.2	Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 2 ..	107
8.2.3	Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 3 ..	110
8.2.4	Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 4 ..	114
8.2.5	Análise da proximidade entre os valores experimentais medidos e a média destes valores .....	117
8.2.6	Comparação da metodologia proposta com o método do furo cego modificado .....	118
<b>9</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>124</b>
9.1.1	Conclusões.....	124
9.1.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	125
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>127</b>
	<b>APÊNDICE A – PROCEDIMENTO MATEMÁTICO PARA O CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL APLICANDO O MÉTODO DO FURO CEGO .....</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE B – IMPLEMENTAÇÃO MATEMÁTICA DAS TENSÕES RESIDUAIS NÃO-UNIFORMES.....</b>	<b>140</b>
	<b>APÊNDICE C – MÉTODO DE REGULARIZAÇÃO DE TIKHONOV .....</b>	<b>142</b>
	<b>APÊNDICE D – MÉTODO PARA CORREÇÃO DA PLASTICIDADE .....</b>	<b>145</b>
	<b>APÊNDICE E – CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO.....</b>	<b>148</b>
	<b>APÊNDICE F – EXPERIMENTO FATORIAL.....</b>	<b>153</b>
	<b>APÊNDICE G – INTERVALO DE CONFIANÇA.....</b>	<b>156</b>
	<b>APÊNDICE H – TESTES DE HIPÓTESES.....</b>	<b>158</b>
	<b>APÊNDICE I – RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>160</b>

<b>APÊNDICE J – ANÁLISE DA VARIÂNCIA SIMPLES .....</b>	<b>169</b>
<b>APÊNDICE L – IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇA ENTRE AS MÉDIAS .....</b>	<b>170</b>
<b>APÊNDICE M – ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES .....</b>	<b>173</b>
<b>APÊNDICE N – HOMOGENEIDADE DAS VARIÂNCIAS .....</b>	<b>174</b>
<b>APÊNDICE O – NORMALIDADE DOS RESÍDUOS.....</b>	<b>175</b>
<b>APÊNDICE P – INDEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS .....</b>	<b>176</b>
<b>APÊNDICE Q – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS TRATAMENTOS .....</b>	<b>180</b>
<b>APÊNDICE R – REPRESENTAÇÃO DO PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DE ELIPSES .....</b>	<b>184</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em projetos mecânicos, o conhecimento em Mecânica dos Sólidos é essencial na concepção do comportamento de componentes estruturais, possibilitando o dimensionamento de sistemas, tubulações, estruturas e componentes para exercer uma determinada função. Por conseguinte, eles têm como propósito estabelecer a forma e a geometria mais apropriadas aos componentes, bem como especificar os materiais e os processos de manufatura mais adequados, de modo que os membros resultantes possam desempenhar uma função desejada sem apresentar alguma falha imprevista (BERROCAL, 1998; BORESI; SCHMIDT, 2003; MOTT, 2004; NORTON, 2013; SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005; TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

O estudo de tensões residuais (TR) é relevante no desenvolvimento de projetos estruturais, visto que a sua ocorrência pode alterar significativamente a resistência dos componentes como, por exemplo, diminuir a resistência à tração, tanto em carregamentos estáticos, quanto em carregamentos dinâmicos. Elas também podem diminuir a resistência à corrosão sob tensão (CST). A CST é um fenômeno em que um componente é sujeito a tensões em um meio corrosivo (HUANG; LIU; DENG, 2010). Sabendo que alterações microestruturais influenciam na resistência à CST, um mesmo material com uma microestrutura composta por grãos menores tende a ser mais resistente à CST, quando comparado com uma microestrutura formada por grãos maiores, sendo este mais suscetível à CST. Um material com uma microestrutura martensítica, produzida por um tratamento térmico de têmpera, por exemplo, resulta em um aumento de resistência à CST (SUN *et al.*, 2014).

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados em componentes estruturais, como as resistências à fratura e à fadiga, podem ser consideravelmente influenciadas pelas TR, trazendo, usualmente, custos elevados com reparos e restauração de equipamentos e estruturas. Assim, TR são um dos principais fatores na influência das propriedades dos materiais e deveriam ser levadas em consideração durante o projeto e a manufatura de produtos. Por exemplo, a presença de TR de tração em uma peça é, geralmente, prejudicial, uma vez que pode contribuir para a falha por fadiga. Por outro lado, as TR compressivas induzidas por diferentes meios nas camadas superficiais e subsuperficiais do material são, normalmente, benéficas, pois podem evitar a nucleação e a propagação de fissuras por fadiga. Exemplos de

operações que produzem tensões trativas prejudiciais são o corte, a usinagem, o esmerilhamento e a extrusão ou trefilação. Sendo assim, as TR podem facilitar a geração de trincas e reduzir a performance de um equipamento (GHASEMI; MOHAMMADI, 2016; PUYMBROECK *et al.*, 2018; ROSSINI *et al.*, 2012; VALIORGUE *et al.*, 2018).

As aplicações de processos de manufatura, térmicos, químicos ou termoquímicos podem gerar TR. Dentre os processos mencionados, há o de conformação, que modifica a forma de um componente devido às deformações plásticas, como os processos de forjamento, laminação e estampagem, produzindo TR (BEGHINI; BERTINI; MONELLI, 2014). Quando um componente estrutural é carregado além de seu limite de escoamento, ocorre uma deformação permanente e, após o descarregamento, todas as tensões, teoricamente, podem desaparecer. Entretanto, esse fenômeno não acontece na prática, pois as TR permanecem em uma estrutura após o descarregamento (MEYER *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019). No entanto, elas podem ser definidas como as tensões elásticas que permanecem dentro de um corpo mesmo com a ausência de carregamentos externos (ROSSINI *et al.*, 2012; SEIFI; SALIMI-MAJD, 2012). Em relação aos processos térmicos, como soldagem e tratamentos térmicos, onde há um aquecimento considerável, as TR são geradas devido às mudanças microestruturais durante o processo (SEIFI; SALIMI-MAJD, 2012). No caso dos tratamentos superficiais, os processos termoquímicos e de deposição de camadas também podem gerar TR (MAINJOT *et al.*, 2011a, 2011b, 2012a, 2012b).

Sabendo que as TR afetam o comportamento do material em relação à resistência, este trabalho tem como motivação prevenir que os materiais sofram falhas devido à TR com níveis significativos, as quais podem comprometer a sua resistência, contribuindo para o desenvolvimento de projetos estruturais. Assim, este trabalho tem como propósito desenvolver uma nova metodologia para obtenção do perfil de TR, com melhor precisão comparada ao método de teste padrão, utilizando rosetas para medição das deformações relaxadas. As deformações relaxadas obtidas pelos experimentos físicos são analisadas com métodos estatísticos, avaliando como elas variam. Os dados experimentais com menor variabilidade são selecionados e, a partir deles, a metodologia proposta é aplicada para a obtenção dos perfis de TR.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos Gerais

Desenvolver uma metodologia para a obtenção de um perfil contínuo de TR ao longo da profundidade de um componente, com uma melhor precisão em relação ao método do furo cego, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), técnicas de otimização não-linear e métodos estatísticos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Encontrar um perfil de TR não-uniforme e contínuo ao longo da profundidade de um componente, aplicando carregamentos definidos por funções de aproximação com a utilização do MEF, considerando que a tensão não seja constante em cada camada analisada;
- ii. Aplicar um método de otimização híbrida, combinando Algoritmos Genéticos e Programação Não-Linear, para minimizar a função erro e encontrar os fatores, os quais possibilitam construir o perfil de TR;
- iii. Analisar o comportamento das TR não-uniformes em profundidades superiores àquelas estabelecidas pela norma ASTM E 837, utilizando as rosetas do Tipo A ou do Tipo B;
- iv. Comparar os resultados obtidos devido à metodologia proposta empregada com aqueles devido à aplicação do método do furo cego, com a introdução da regularização de Tikhonov e com a correção da plasticidade localizada.

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES

O campo de TR descontínuo obtido pela aplicação do método de teste padrão é aproximado, pois os valores das tensões podem ser distintos em cada camada subsequente ao longo da profundidade de um material. Assim, para aparecer uma descontinuidade do campo de TR, seria necessária uma força concentrada. Fisicamente, a ocorrência de uma descontinuidade no campo de tensões, exigiria a aplicação de uma força concentrada aplicada no interior do corpo. Logo, a metodologia a ser abordada neste trabalho propõe corrigir essa simplificação,

apresentando uma melhoria em relação ao método do furo cego. Com isso, é possível obter um campo de TR contínuo ao longo da profundidade de um componente em profundidades superiores às estipuladas pela norma ASTM E 837.

### 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

No presente Capítulo foram apresentados os princípios de projetos mecânicos e, com ênfase nos motivos de se estudar o comportamento das TR, foram levantados os objetivos e as contribuições que o trabalho pode propiciar. No segundo Capítulo é apresentada uma revisão da literatura, baseada em trabalhos com temas relacionados. No terceiro Capítulo são mostrados alguns conceitos de métodos de aproximação e, com isso, as definições de funções de forma para um dado segmento. No quarto Capítulo são apresentados os fundamentos de técnicas de otimização matemática. O quinto Capítulo mostra uma revisão bibliográfica acerca dos métodos estatísticos com o intuito de realizar uma análise fatorial dos resultados experimentais e, com isso, validar os experimentos realizados. O sexto Capítulo apresenta, através da Série de Fourier, uma aproximação das deformações residuais ao longo da direção circunferencial e, a partir delas, é desenvolvida a metodologia proposta neste trabalho para o cálculo das TR. No Capítulo sete são apresentados os materiais e os métodos a serem utilizados no desenvolvimento do trabalho. No oitavo Capítulo, com intuito de validar os dados experimentais, são aplicados métodos estatísticos e, com isso, aplicada a metodologia com os dados experimentais, explanando os resultados esperados. No nono Capítulo é apresentada a conclusão do trabalho, que destaca a sua viabilidade e as sugestões para os trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Na literatura podem ser encontrados diversos métodos de medição de tensões residuais (TR), tais como métodos não destrutivos, destrutivos ou semi-destrutivos, os quais são apresentados neste Capítulo. Considerando as aplicações e as particularidades de cada método, dependendo da natureza do componente, tipos de tensões, gradientes térmicos, forma do componente, profundidade pretendida, precisão exigida e outros fatores, seleciona-se o mais apropriado (PAIVA, 2015). Neste Capítulo é enfatizado o método do furo cego e apresentado o estado da arte acerca dos métodos de medição de TR correlacionados ao método do furo cego.

### 2.2 MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos não destrutivos têm por característica principal medir as mudanças nos espaçamentos entre os planos cristalinos do material decorrente da presença de TR. Esses métodos, quanto à abrangência, além de avaliar as TR macroscópicas, possibilitam examinar as TR microscópicas. Entre os métodos não destrutivos utilizados para a medição de TR, existem diversas técnicas, como ultrassom, difração de raios-X, difração de síncrotron e difração de nêutrons.

A técnica de difração de raios-X é a técnica não destrutiva mais usada, principalmente pelas suas praticidade e efetividade, e é especializada na medição de TR superficiais. Essa técnica é baseada no espaçamento interatômico do material (LIN; MA; LEI, 2017; MOUSSAOUI *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2017).

A técnica de difração de síncrotron, conhecida como difração de raio-X de alta energia, utiliza o mesmo princípio da difração de raios-X padrão. Em relação a esta, a técnica de síncrotron tem uma maior capacidade de penetração e um menor tempo de aquisição dados. A incidência de raios-X de alta energia, que são difratados, possibilita medir a mudança na separação dos planos da rede atômica devido às TR (HOLMBERG; STEUWER; STORMVINTER, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2016).

A técnica de difração de nêutrons é uma técnica não destrutiva que mede as TR mais profundas dentro de um material com base na detecção das difrações de um feixe de nêutrons incidente. O feixe de nêutrons difratado permite a identificação de

mudanças no espaçamento da rede atômica devido às TR. As mudanças relativas no espaçamento são comparadas a uma amostra de material sem a presença de TR, permitindo calcular os valores das TR (HEMMESI; FARAJIAN; BlmOIN, 2017; SEO *et al.*, 2017; STEGEMANN *et al.*, 2017).

A técnica de medição ultrassônica é uma técnica não destrutiva aplicável a diversos materiais. As ondas ultrassônicas são, comumente, usadas para detectar descontinuidades em materiais. Elas também podem ser usadas para a medição de TR. A velocidade das ondas ultrassônicas que se propagam através de um material é afetada pela direção e magnitude das TR presentes. Desta maneira, a magnitude e a direção das TR presentes dentro dos materiais podem ser calculadas, medindo com precisão a mudança no tempo de propagação de uma onda ultrassônica que se propaga pelas regiões tensionadas e não tensionadas dos materiais (MININ; TROFIMOV; TROFIMOV, 2016; ZHAN *et al.*, 2017).

Os métodos não destrutivos, comparados aos métodos semi-destrutivos e destrutivos, são mais rápidos e eficientes, e possibilitam medir tensões em escala microscópica. Porém, os métodos não destrutivos possuem algumas desvantagens tais como: dificuldade de serem utilizados em geometrias complexas como, por exemplo, uma junta soldada; custo mais elevado e necessidade de um treinamento específico aos inspetores, podendo ser aplicados em campo.

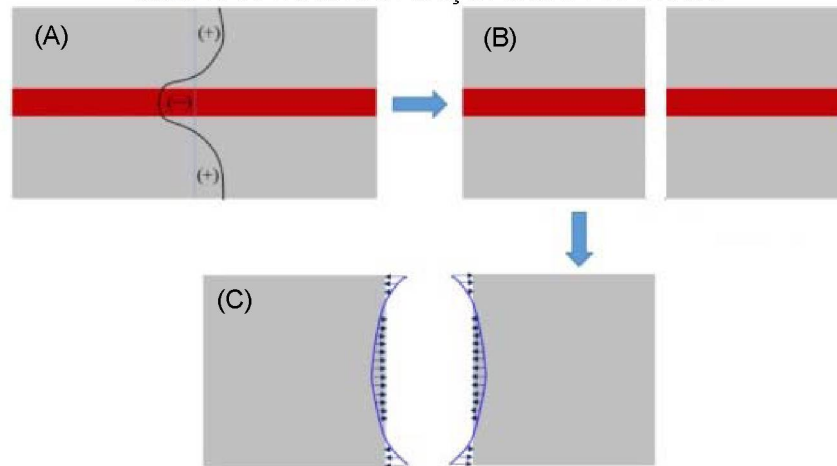
### 2.3 MÉTODOS DESTRUTIVOS

Os métodos destrutivos, diferentemente dos métodos não destrutivos, caracterizam-se pela remoção de material do componente durante a aplicação da técnica e do seu descarte funcional. Dentre os diversos métodos destrutivos utilizados para a avaliação das TR, encontram-se o método do contorno, o método de Sanchs-Boring e o método do corte.

O método do contorno é um método destrutivo empregado para investigar a tensão residual normal à seção de corte. Essa técnica é baseada no princípio da variação da superposição elástica de Bueckner, o qual afirma que um corpo fraturado, sujeito a carregamentos externos, apresenta TR nas superfícies de fratura. Essa técnica envolve um corte integral da amostra por eletroerosão (FIGURA 1), a avaliação das deformações usando um equipamento de medição por coordenadas, com base nas distorções presentes na superfície de corte, resultantes do alívio de

deformações e, por fim, as TR são recalculadas usando análises por elementos finitos (MURÁNSKY *et al.*, 2016a, 2016b; WAN *et al.*, 2017).

FIGURA 1 - ETAPAS DO MÉTODO DO CONTORNO: (A) PREVISÃO TEÓRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES, (B) EXECUÇÃO DO CORTE E (C) REPRODUÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS COM BASE NAS DISTORÇÕES SUPERFICIAIS.



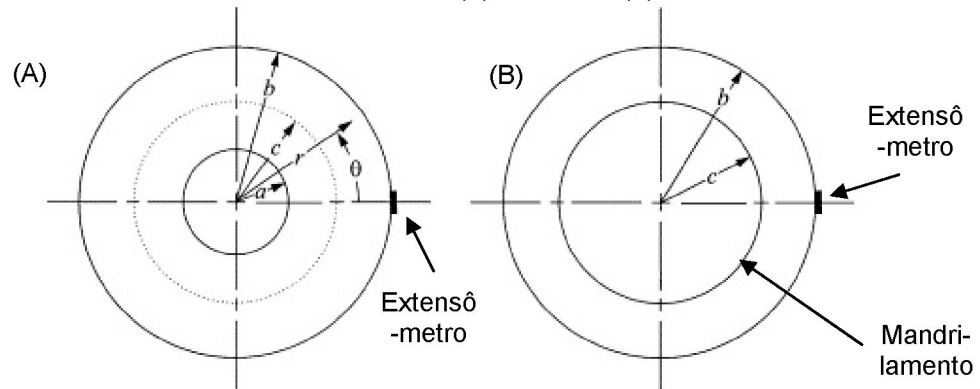
FONTE: Adaptado de Gadallah *et al.*, (2015).

Uma alternativa ao método do contorno é a utilização do método de Sanchs-Boring. Esse método consiste na medição de TR axissimétricas a partir da análise do alívio de deformações durante a retirada incremental de camadas de material através do processo de mandrilamento (FIGURA 2). Para realizar a técnica, os extensômetros são instalados na superfície lateral externa do componente antes da remoção de material. O processo de retirada incremental de material é realizado a partir da face interna em direção à superfície externa onde estão fixados os extensômetros. Cada incremento de usinagem remove uma camada axissimétrica do componente até não ser mais possível medir o alívio de deformação (GARCIA-GRANADA; LACARAC; SMITH, 2001).

A técnica do corte é uma técnica destrutiva na qual são medidas com precisão as TR próximas à superfície e ao longo da espessura a partir do alívio das deformações. A técnica envolve o corte de uma fenda por eletroerosão em um componente (FIGURA 3), sendo que a medição das deformações superficiais é realizada por extensômetros localizados ao lado da fenda. Durante o procedimento, a profundidade da fenda é aumentada de forma incremental para profundidades predeterminadas e, em cada incremento de profundidade a deformação é medida. Os alívios das deformações superficiais estão relacionados às tensões ao longo da

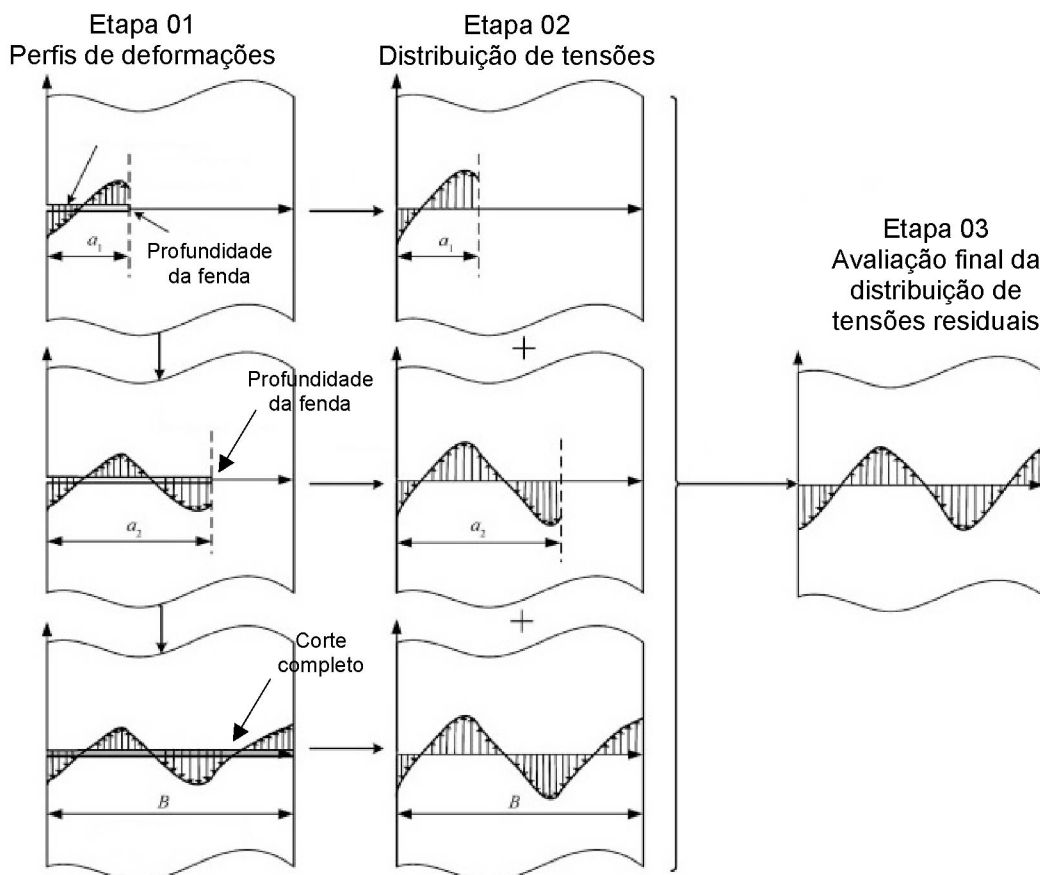
espessura da amostra usando coeficientes numericamente determinados (JONES; BUSH, 2017; SHOKRIEH; JALILI; KAMANGAR, 2018; XU; BAO, 2017).

FIGURA 2 - MÉTODO SANCHS-BORING: (A) ANTES E (B) DEPOIS DE MANDRILAR.



FONTE: Adaptado de Garcia-Granada et al., (2001).

FIGURA 3 - MÉTODO DO CORTE.



FONTE: Adaptado de Xu e Bao (2017)

Em relação a outras técnicas de medição de TR, os métodos destrutivos têm a grande vantagem de poder medir tensões em profundidades significativas de um

componente e poder analisar o campo tridimensional das TR presentes. Por outro lado, a grande desvantagem é a inutilização da amostra após ser aplicada a técnica.

## 2.4 MÉTODOS SEMI-DESTRUTIVOS

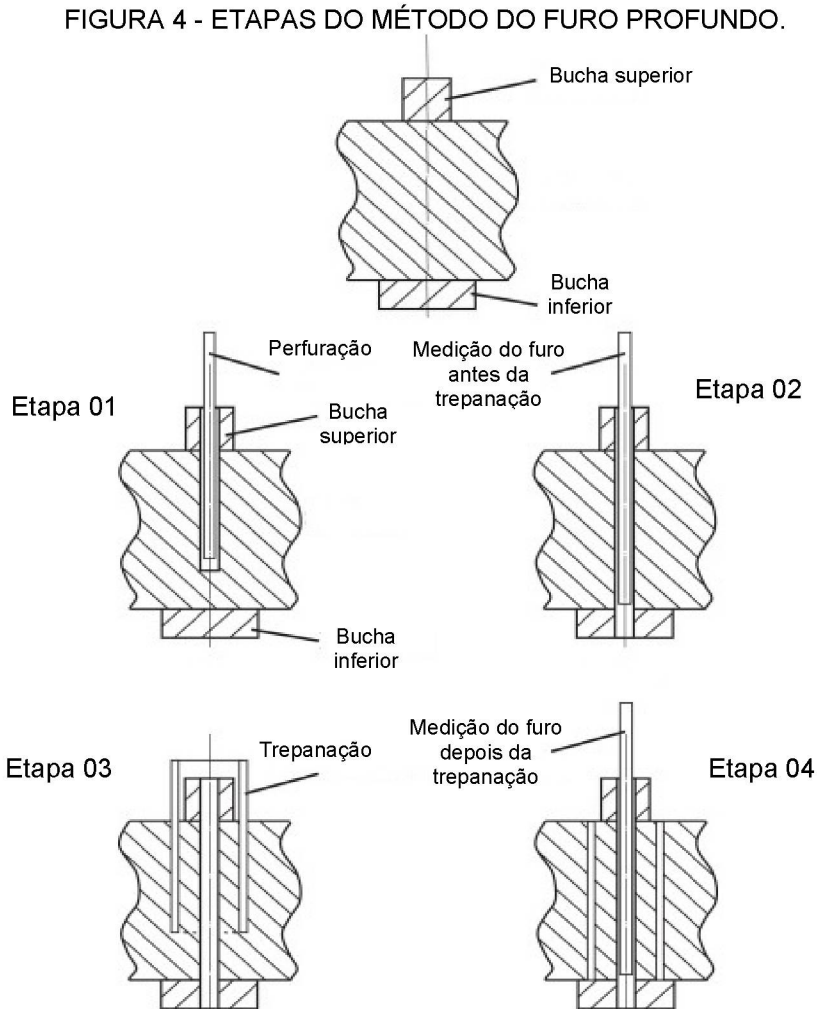
Outra forma de medir TR é através das técnicas semi-destrutivas, como o método do furo profundo, a técnica do núcleo toroidal e a técnica do furo cego. Enquanto os métodos não destrutivos não alteram a funcionalidade ou a resistência mecânica do componente analisado, os métodos semi-destrutivos causam algum dano no componente, os quais podem ser significativos ou não, podendo comprometer ou não a sua operação.

O método do furo profundo é um método semi-destrutivo usado para medir as TR em seções espessas (FIGURA 4). A técnica do furo profundo envolve a perfuração de um furo guia ao longo do componente (FIGURA 4 - Etapa 1) e a medição com precisão do seu diâmetro antes (FIGURA 4 - Etapa 2) e depois (FIGURA 4 - Etapa 4) do alívio de tensão causado pela execução da trepanação (FIGURA 4 - Etapa 3) em torno do furo guia. As diferenças entre os diâmetros medidos antes e depois do alívio de tensões permitem que as TR originais sejam calculadas (GARZA; DAS; SHTERENLIKHT, 2018; JAMES; NEWBY; DOUBELL, 2014; SKOURAS *et al.*, 2013).

A técnica do núcleo toroidal é uma técnica semi-destrutiva baseada no alívio de deformações e é usada para medir TR, uniformes ou não-uniformes, próximas à superfície. Essa técnica envolve a realização de uma ranhura anular concêntrica (FIGURA 5 - Região II) em torno dos extensômetros situados na região central do componente (FIGURA 5 - Região I). Através dos alívios das deformações aferidos pelos extensômetros posicionados na superfície do núcleo central (FIGURA 5 - Região I), são determinadas as TR para cada incremento de profundidade (BOUFFIOUX; PESCI; BOMAN, 2016; GIRI; MAHAPATRA, 2017).

A técnica do furo cego consiste em medições das deformações, através de extensômetros, causadas pelo alívio das TR durante perfurações incrementais. Em outras palavras, uma porção do material que está sob TR é removida e, com isso, ocorre um alívio de tensões. A FIGURA 6 mostra a região de instalação de uma roseta em um componente antes e depois da execução da perfuração no seu centro. Essa técnica pode ser usada para calcular as TR uniformes ou não uniformes ao longo da profundidade do material. Na prática, normalmente, as tensões variam com a

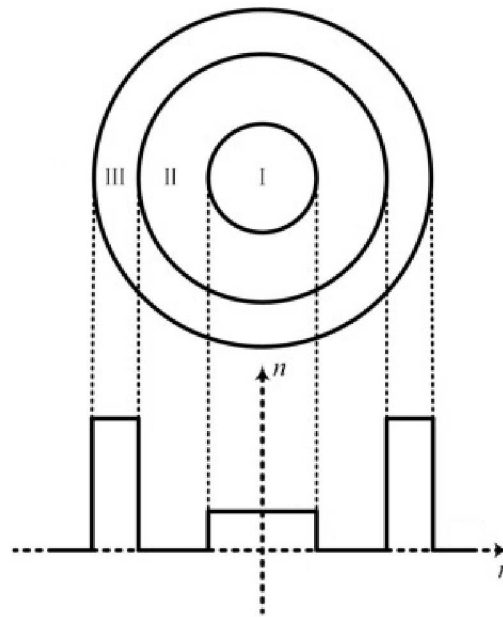
profundidade a partir da superfície. Entretanto, esse método considera que a tensão é supostamente constante dentro de cada camada correspondente ao incremento de perfuração (LOTHHAMMER; VIOTTI; ALBERTAZZI, 2017).



FONTE: Adaptado de Zheng et al., (2017).

O método do furo cego permite medir tensões residuais em peças fundidas e em juntas soldadas, desde que haja uma preparação da amostra, a qual é submetida a operações de desbastes e de lixamentos. Esse método apresenta algumas limitações como: sensibilidade dos extensômetros com o aumento da profundidade; erros experimentais; aplicação apenas em materiais linear-elásticos e necessidade de que as TR não ultrapassem 60% da tensão de escoamento do material.

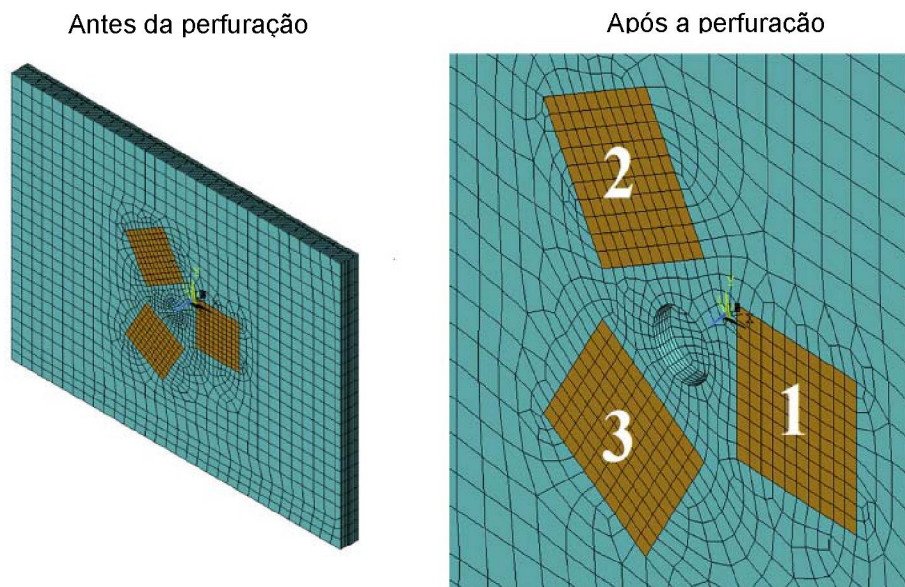
FIGURA 5 - MÉTODO DO NÚCLEO TOROIDAL.



FONTE: Adaptado de Zhu et al., (2015).

Dentre todos os métodos apresentados, o método do furo-cego é aquele abordado neste trabalho por conta de sua praticidade, mobilidade do equipamento, possibilidade de aplicação em diversos materiais, facilidade em medir TR com precisão e, principalmente, devido a seu baixo custo de execução.

FIGURA 6 - MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS DESTACANDO AS REGIÕES DE INSTALAÇÕES DOS EXTENSÔMETROS E DE REALIZAÇÃO DOS FUROS NO MÉTODO DO FURO CEGO.



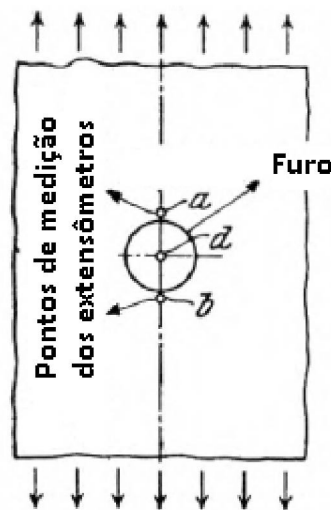
FONTE: Adaptado de Hosseini; Akbari; Shokrieh (2019).

## 2.5 MÉTODO DO FURO CEGO

Os primeiros métodos de avaliação das TR, a partir de medições de deformações em torno de furos para materiais isotrópicos e homogêneos, foram propostos por Mathar (1934). Conforme mostra a FIGURA 7, esse método se baseia na variação das posições nos pontos “a” e “b” em torno do furo antes e depois da perfuração.

Rendler e Vigness (1966) definiram coeficientes de calibração para materiais elásticos e isotrópicos, estabelecendo relações lineares entre as TR e as deformações relaxadas medidas por extensômetros (FIGURA 08). Esses extensômetros foram posicionados em três diferentes direções formando uma roseta que, subsequentemente, resultou no surgimento da roseta do Tipo A (FIGURA 10.A), segundo a denominação apresentada na norma (ASTM E 837-13, 2013).

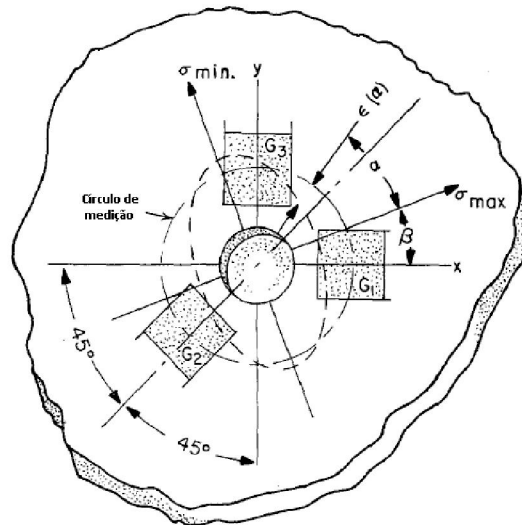
FIGURA 7 - FURO COM DOIS DOIS PONTOS DE MEDIÇÃO.



FONTE: Adaptado de Mathar (1934).

Cordiano e Salerno (1969) apresentaram, com o desenvolvimento de vários trabalhos, rosetas compostas por extensômetros espaçados em 45°, como mostra a FIGURA 9, ocasionando o surgimento da roseta do Tipo B (FIGURA 10.B), como consta na norma ASTM E 837-13 (2013). A roseta do Tipo B tem uma grande vantagem em relação às demais pelo fato de permitir medições em locais próximos a obstáculo.

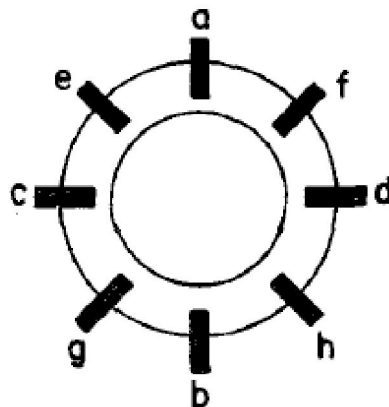
FIGURA 8 - AMOSTRA DE UMA PLACA COM TRÊS EXTENSÔMETROS EM TORNO DE UM FURO.



FONTE: Adaptado de Rendler e Vigness (1966).

Os métodos propostos para medição de TR têm como base a utilização de uma roseta com três extensômetros para medições em três direções diferentes, combinando as equações de forma a encontrar as TR presentes. Com isso, Beaney (1976) estabeleceu as dimensões a serem usadas pelos extensômetros para medir TR em torno de um furo que impactou na origem das rosetas do Tipo A (FIGURA 10.A) e Tipo B (FIGURA 10.B) como consta na norma ASTM E 837-13 (2013).

FIGURA 9 - EXTENSÔMETROS ESPAÇADOS EM 45°.

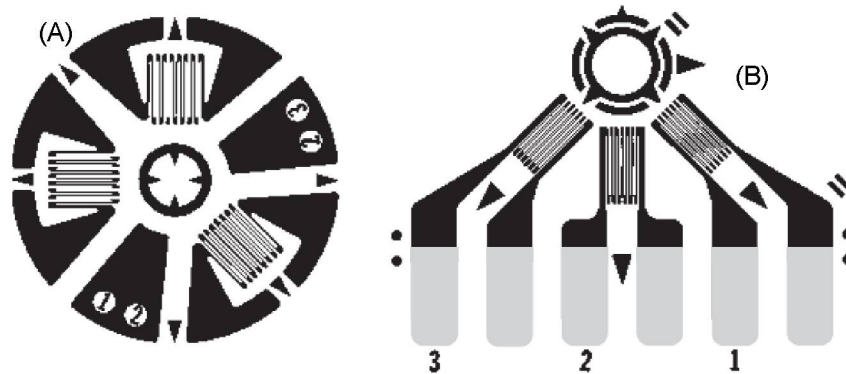


FONTE: Adaptado de Cordiano e Salerno (1969).

Para ajustar o tamanho do furo e as dimensões das rosetas, Schajer (1981) estabeleceu coeficientes utilizados no modelo matemático para calcular as TR considerando seus valores constantes ao longo da profundidade (FIGURA 11(a)). Com as experimentações e análises realizadas, constatou-se que, em geral, as

deformações variavam com a profundidade de um componente (FIGURA 11(b)). Assim, Schajer (1988a, 1988b), através da utilização do MEF, obteve uma matriz de coeficientes de calibração (APÊNDICE E) que considera, além das dimensões do furo e dos extensômetros, o valor da profundidade de cada incremento de perfuração (SCHAJER, 1991).

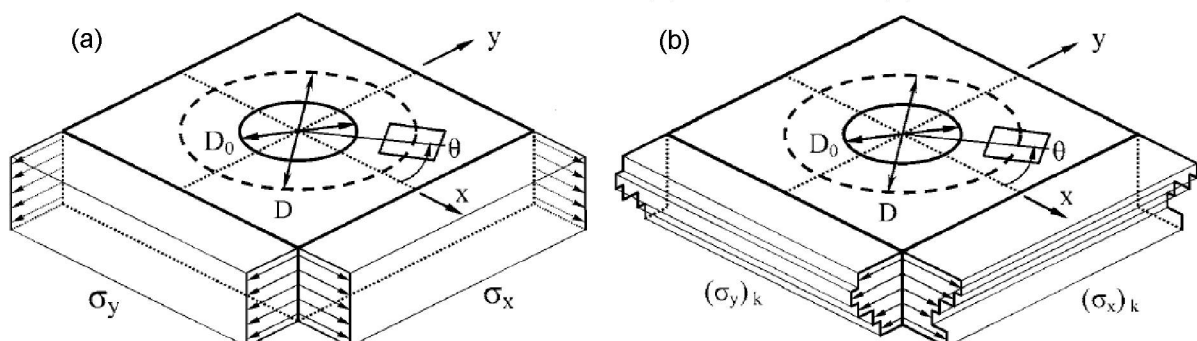
FIGURA 10 - ROSETAS: (A) TIPO A (B) TIPO B.



FONTE: ASTM E 837-13 (2013).

Para medição das deformações foram usados diversos modelos de rosetas até que um tipo de roseta com pares de extensômetros foi desenvolvido (FIGURA 12), a fim de alcançar uma melhor precisão para aprimorar os resultados (SCHAJER; TOOTOONIAN, 1997). Essa roseta foi denominada roseta do tipo C pela norma ASTM E 837-13 (2013). Apesar de apresentar uma melhor precisão, ela é menos utilizada que as rosetas do tipo A e do Tipo B devido ao seu elevado custo.

FIGURA 11 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS: (A) UNIFORMES E (B) NÃO UNIFORMES.

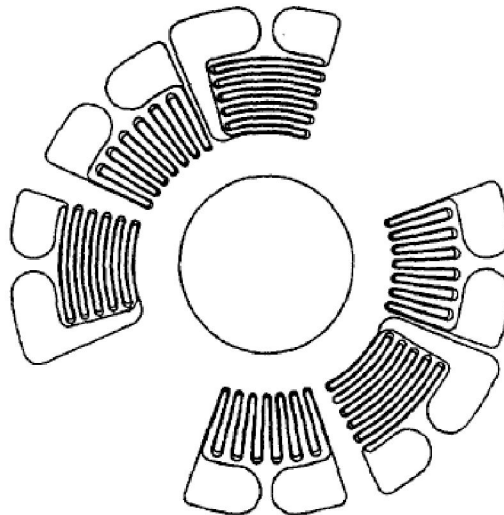


FONTE: ASTM E 837-13 (2013).

Durante os experimentos físicos nos quais são medidas as deformações, há erros de medição que acabam influenciando nos resultados. Dentre os possíveis erros presentes nas medições, destacam-se os erros sistemáticos ou aleatórios. Erros

sistemáticos, conhecidos como aqueles que conduzem a valores sistematicamente desviados, aparecem, entre outros fatores, devido às más condições de calibração do equipamento de medição; uso dos equipamentos em condições diferentes das que são recomendadas; leituras incorretas do observador e utilização de um método físico inadequado. Os erros aleatórios, conhecidos como aqueles que não são controlados, os quais culminam em uma menor precisão das medições, podem acontecer devido à falta de sensibilidade dos instrumentos e de ruídos como vibrações mecânicas ou elétricas e interferências.

FIGURA 12 - ROSETA MODIFICADA COMPOSTA POR TRÊS PARES DE EXTENSÔMETROS.



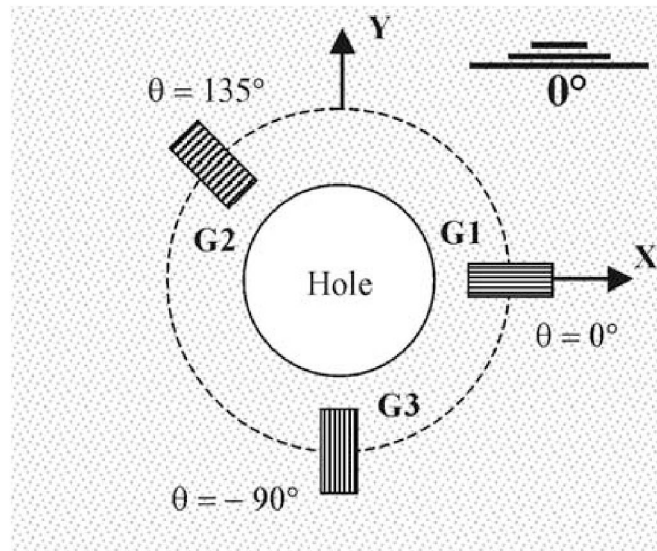
FONTE: Adaptado de Schajer e Tootonian (1997).

Considerando que um erro sistemático é associado ao ruído, o qual provoca flutuações aleatórias e que diminui a precisão nos dados experimentais, existem métodos para suavizar esse tipo de contaminação, tais como os métodos de regularização. O método da regularização consiste na determinação de uma solução aproximada mais estável com pequenas variações, a partir dos dados de observação, para certo nível de ruído (AUCEJO; DE SMET, 2018; BUCCINI, 2017). A busca de uma solução mais suave (regular) é uma informação adicional, que transforma o problema mal posto num problema bem-posto. Levando em consideração os ruídos originários de experimentos físicos, diversas técnicas de suavização foram desenvolvidas com o objetivo de reduzir esses efeitos e refinar os dados experimentais (SCHAJER, 2007; SCHAJER; PRIME, 2006).

A regularização de Tikhonov (APÊNDICE C), conforme consta na norma ASTM E 837-13 (2013), tem como intuito suavizar a curva da tensão residual em

função da profundidade, a fim de mostrar o seu comportamento (ATTOUCH; CHBANI; RIAHI, 2018; BERNTSSON; KOZLOV; MPINGANZIMA, 2017; HE; PAN, 2015). Esse método de regularização foi introduzido na norma ASTM E 837-08 (2008) a qual estabelece o método padrão para determinação das TR, com a utilização de rosetas para medir as deformações aliviadas durante a execução dos furos. No método de teste padrão para obtenção do perfil de TR (APÊNDICE A), um furo é realizado na região central da roseta e as deformações aliviadas são medidas pelos extensômetros da roseta (FIGURA 13). Com os valores das deformações encontradas, o perfil de TR pode ser obtido aplicando o método de teste padrão (APÊNDICE B).

FIGURA 13 - ROSETA UTILIZADA NO MÉTODO DO FURO CEGO.



FONTE: Adaptado de Lin et al. (2014).

## 2.6 ESTADO DA ARTE

Com todas as informações estudadas acerca do método do furo cego desde o início (MATHAR, 1934), o processo passou por diversas modificações até chegar ao método de teste padrão para determinação da tensão residual estabelecido pela norma ASTM E 837-13 (2013). Assim, desde 2013 esse método não apresentou mudanças significativas na forma de calcular as TR.

A maneira como é realizada a perfuração pode induzir erros sistemáticos, tais como o deslocamento radial do furo e outros tipos de distorções geométricas, que produzem desvios nas medições e influenciam os resultados aferidos durante a aplicação do método. Levando em consideração esses efeitos sobre a avaliação das

TR, foram construídas funções de influência com a assistência da simulação numérica pelo MEF, com base nos parâmetros experimentais, tais como: dimensões da roseta; diâmetro furo; excentricidade; dentro outros. Nas funções de influências construídas, são incorporadas constantes que ajustam valores numéricos aos valores experimentais, com a finalidade de corrigir os efeitos mencionados os quais podem causar erros sistemáticos. (BEGHINI; BERTINI; MORI, 2009, 2010a, 2010b).

Alguns trabalhos recentes introduziram considerações em relação às incertezas de medição para ajustar os valores calculados com base na simulação numérica, os quais podem existir em decorrência da excentricidade entre o centro do furo e a posição teórica, do raio do filete do furo e outros fatores. Para solucionar essas incertezas, constantes corretoras foram introduzidas ao método de teste padrão para calcular as TR. Tratando-se de materiais que seguem a TEL, esse procedimento matemático foram aplicados a um material com características nominais conhecidas, como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, diâmetro do furo, entre outros parâmetros, e então estendido a outros por simulação numérica. Com a realização do procedimento matemático, torna-se possível quantificar o aumento ou a diminuição da tensão máxima residual com base no deslocamentos das coordenadas micrométricas do centro do furo aferidos experimentalmente devido às distorções dimensionais (PERAL *et al.*, 2017a, 2017b).

No método do furo cego, quando a tensão residual do material está próxima à tensão de escoamento, durante a perfuração, deformações plásticas em torno do furo podem ser geradas devido às concentrações de tensão ao seu redor. Como as relações no método de teste padrão estão na faixa elástica das deformações, os efeitos de plastificação podem influenciar nos valores das deformações relaxadas medidas pelos extensômetros, podendo causar um erro significativo nas tensões residuais. Com o intuito de corrigir esses efeitos, conforme consta no APÊNDICE D, um procedimento, que leva em consideração a plastificação localizada induzida, devido às perfurações incrementais, foi desenvolvido para estabelecer uma correção do efeito da plasticidade local produzida durante o processo de perfuração (MAHMOUDI *et al.*, 2011; SEIFI; SALIMI-MAJD, 2012; VANGI; TELLINI, 2010).

A utilização da Interferometria Digital de Padrões de Speckle (IDPS), com o uso de um dispositivo óptico portátil, combinado com a técnica do furo cego para medir o campo de TR, pode alcançar resultados mais precisos em função da interferometria quando comparado ao método de teste padrão. A IDPS usa emissão de laser para

capturar imagens da superfície de medição antes e após cada incremento de perfuração, para que as deformações na superfície, devido ao alívio de tensão, possam ser quantificadas. Nessa técnica, as repetições das medições podem ser realizadas com facilidade e rapidez, resultando em uma melhora na qualidade das medições e, com isso, podendo ser bem avaliadas. Entretanto, como principal desvantagem, essa técnica tem um elevado custo para instrumentação e execução dos ensaios (LOTHHAMMER; VIOTTI; ALBERTAZZI, 2017; PISAREV *et al.*, 2018; RICKERT, 2016).

O processo de usinagem por eletroerosão, combinado com o método de teste padrão para determinação das TR, é um método alternativo e semelhante ao teste padrão do furo cego, diferenciando-se apenas na forma de executar o furo. A remoção de material ocorre devido à incidência de descargas elétricas através de um eletrodo em direção à região da peça onde é produzida uma cavidade, e não há contato mecânico entre a ferramenta e a peça de trabalho. Esse processo, que utiliza a eletroerosão para execução do furo, tem algumas vantagens em relação ao processo que usa uma broca para a execução do furo, tais como: 1) a possibilidade de perfurar materiais de difícil usinabilidade não tradicionais como carbonetos metálicos, aço ferramenta e superligas; 2) o fornecimento de uma superfície com uma boa qualidade; 3) não produz cavacos, não conta com formação de rebarbas e, praticamente, não gera distorções dimensionais no furo. Por outro lado, existem algumas desvantagens, tais como: a indução do encruamento na zona de medição, o que modifica as propriedades mecânicas locais, devido ao aquecimento durante o processo de perfuração por EDM, e o resfriamento subsequente. Essas tensões induzidas podem causar consideráveis erros medição (LEE; LIU, 2009; PANDEY, 2019; WINKLER *et al.*, 2019).

O método de teste padrão para determinação de tensões residuais pode ser combinado com o sistema de Correlação de Imagem Digital (CID) para quantificação e indentificação das tensões residuais. A CID é um método baseado na correlação de imagens digitais do objeto capturado durante o processo de carregamento com a imagem correspondente ao seu estado de referência. A CID é um método óptico que emprega técnicas de escaneamento e registro de imagens para medições mais precisas e exatas das deformações. Um método de perfuração, com a combinação da CID, é usado para medir o relaxamento da deformação transversal devido à remoção de material. As TR são determinadas com base no método de teste padrão para sua

determinação, a partir das deformações relaxadas medidas pelo sistema de CID. A principal vantagem de combinar a CID ao método de teste padrão é a precisão das deformações relaxadas medidas durante as perfurações incrementais, e a dispensabilidade da utilização de rosetas com extensômetros. Por outro lado, há limitações, tais como: a precisão dos resultados obtidos pelo CID depende de alguns fatores como, por exemplo, a experiência e a habilidade dos instrumentistas; a qualidade das imagens adquiridas; parâmetros de calibração e um adequado ajuste dos parâmetros de correlação (BABAEEIAN; MOHAMMADIMEHR, 2020; BRYNK; ROMELCZYK-BAISHYA, 2018; HAGARA; TREBUŇA; PÁSTOR, 2019; YUKSEL *et al.*, 2019).

Considerando que não houve mudanças efetivas no método de teste padrão para obtenção do perfil de tensão residual, este trabalho apresenta uma proposta para obtenção de um perfil contínuo de TR ao longo da espessura de um componente. Nesta metodologia proposta, a medição das deformações com o uso de rosetas permanece com o mesmo procedimento experimental estabelecidos pela norma ASTM E 837-13. Porém, as formas de tratar os dados e calcular as TR são diferentes da metodologia estabelecida em norma. Além disso, neste trabalho é analisado o comportamento da TR em profundidades, além daquelas estipuladas pela norma padrão.

### 3 MÉTODO DE APROXIMAÇÃO POR INTERPOLAÇÃO POLINOMIAL

Neste Capítulo é abordada a aproximação de uma função contínua por uma função também contínua, mas linear por partes, a partir do método de interpolação de Lagrange.

#### 3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE INTERPOLAÇÃO LINEAR

A interpolação pode ser definida como um método que possibilita construir uma função a partir de dados discretos conhecidos que não possuem continuidade. Logo, através da interpolação, é possível construir uma função contínua, ou contínua por partes, que permite aproximar determinados dados discretos. Os tipos de funções mais comumente usadas, em métodos de aproximação, são as funções polinomiais, exponenciais e trigonométricas. Dentre elas, as funções polinomiais são muito utilizadas na engenharia devido à praticidade de manipulação e por serem facilmente computáveis (COOK; MALKUS; PLESHA, 2002; FISH; BELYTSCHKO, 2007; REDDY, 2006).

#### 3.2 APROXIMAÇÃO LINEAR POR PARTES DE UMA FUNÇÃO CONTÍNUA

Supõe-se que haja diversos pontos discretos a partir de dados experimentais e que, teoricamente, uma função desconhecida e contínua passe por esses pontos, como mostra a FIGURA 14 (FISH; BELYTSCHKO, 2007; REDDY, 2006). Essa função real  $u(x)$  pode ser substituída por uma função de aproximação linear por partes, denotada  $\hat{u}(x)$ , como

$$u(x) \sim \hat{u}(x) = \sum_{e=1}^n \hat{u}^e(x) \quad (1)$$

onde  $\hat{u}^e$  é uma função de aproximação linear para um e-ésimo segmento.

Com isso, é possível construir uma curva composta por  $n$  segmentos lineares conectados, os quais mostram o comportamento linear ao longo da espessura de cada segmento, como mostra a FIGURA 15 (FISH; BELYTSCHKO, 2007; REDDY, 2006).

FIGURA 14 - A FUNÇÃO CONTÍNUA DESCONHECIDA TEÓRICA.

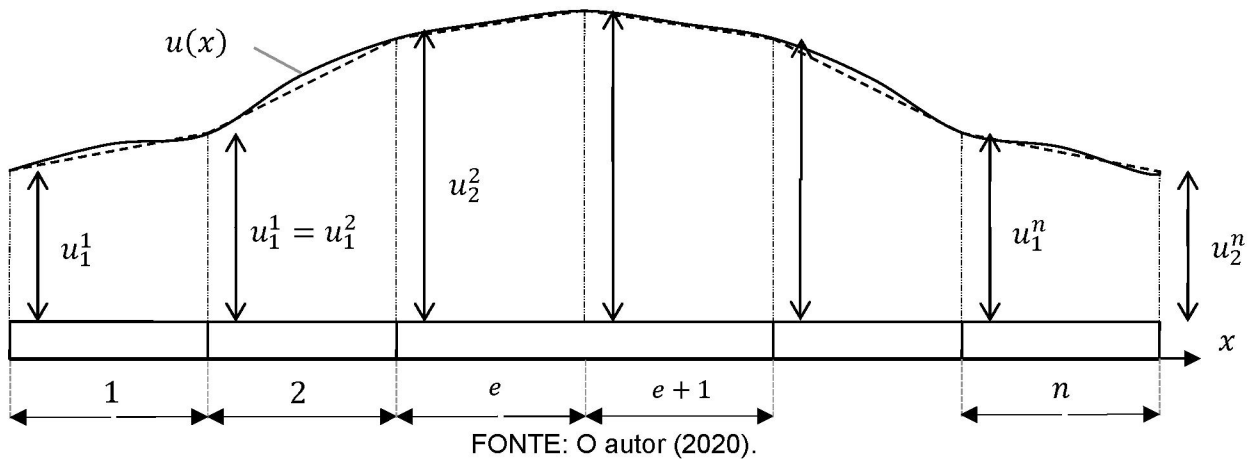
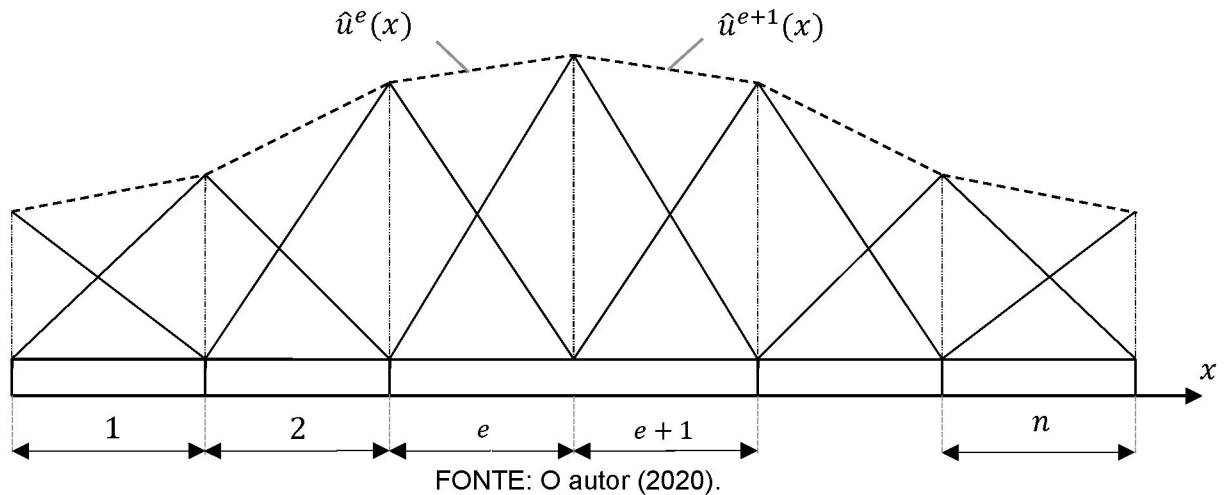


FIGURA 15 - FUNÇÕES DE INTERPOLAÇÃO PARA SEGMENTOS LINEARES.



### 3.3 APROXIMAÇÃO COM FUNÇÕES LINEARES

Com base no método de interpolação polinomial de Lagrange, com o intuito de aproximar pontos discretos, faz-se uma combinação linear

$$\hat{u}^e(x) = \sum_{j=1}^{nf} u_j^e \psi_j^e(x) \quad (2)$$

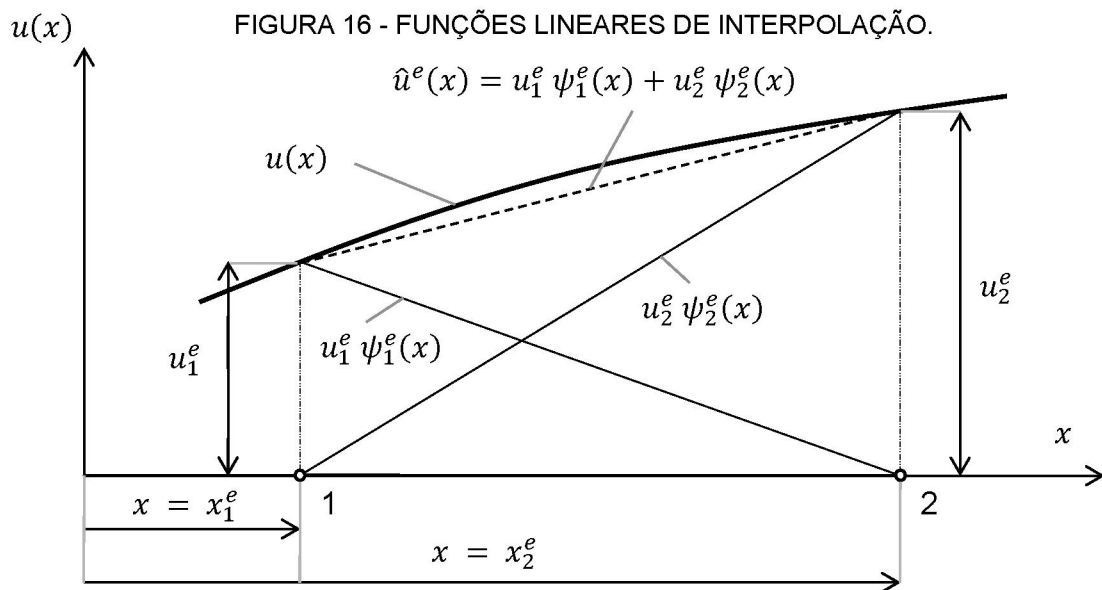
onde  $u_j^e$  é o valor nodal no  $j$ -ésimo nó do  $e$ -ésimo elemento,  $\psi_j^e$  é  $j$ -ésima função de forma de Lagrange para um  $e$ -ésimo segmento linear.

Considera-se que cada segmento possui  $nf$  funções de forma lineares. Isso resulta em uma combinação linear na forma de Lagrange (FIGURA 16). Assim, a

equação na forma expandida que descreve o comportamento linear para cada segmento é mostrada conforme a equação

$$\hat{u}^e(x) = u_1^e \psi_1^e(x) + u_2^e \psi_2^e(x). \quad (3)$$

Essa equação mostra um comportamento linear para um dado segmento delimitado entre dois pontos.



FONTE: O autor (2020).

### 3.4 FUNÇÕES DE FORMA LINEARES

A função de aproximação linear  $\hat{u}^e(x)$  para um segmento finito linear  $e$ , conforme ilustra a FIGURA 17, é composta pelas funções de forma  $\psi_1^e(x)$  e  $\psi_2^e(x)$ , as quais podem ser descritas como funções lineares na forma

$$\psi_1^e(x) = \alpha_1 \cdot x + \beta_1 \quad (4)$$

e

$$\psi_2^e(x) = \alpha_2 \cdot x + \beta_2. \quad (5)$$

Com base nas condições apresentadas no segmento de comprimento  $L_e$  (FIGURA 17), os coeficientes  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  da função  $\psi_1^e(x)$  encontrados são

$$\alpha_1 = -\frac{1}{L_e}, \quad \beta_1 = 1 \quad (6)$$

e substituindo os coeficientes  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  na equação 4, tem-se:

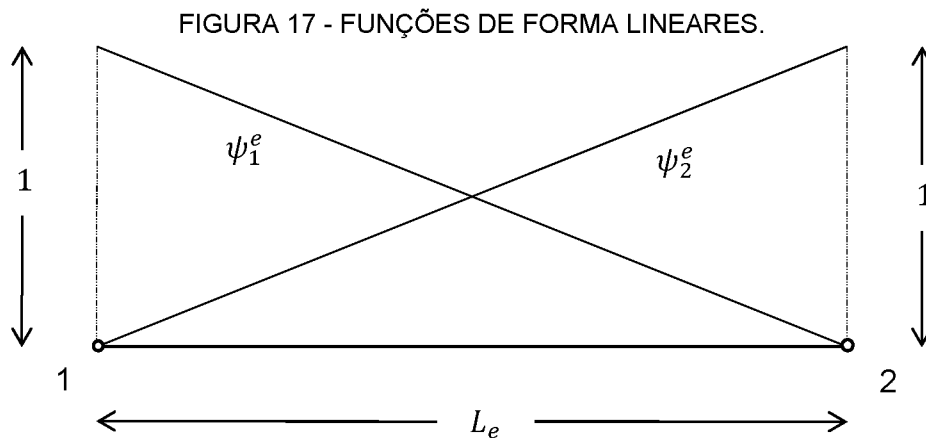
$$\psi_1^e(x) = 1 - \frac{x}{L_e}, \quad (7)$$

Para a função  $\psi_2^e(x)$ , os coeficientes  $\alpha_2$  e  $\beta_2$  encontrados são

$$\alpha_2 = \frac{1}{L_e}, \quad \beta_2 = 0 \quad (8)$$

e substituindo os coeficientes  $\alpha_2$  e  $\beta_2$  na equação 5, tem-se:

$$\psi_2^e(x) = \frac{x}{L_e}. \quad (9)$$



FONTE: O autor (2018).

Com isso, a FIGURA 17 ilustra o comportamento linear das funções  $\psi_1^e(x)$  e  $\psi_2^e(x)$  para o segmento  $e$  com comprimento  $L_e$ . Enquanto que a função  $\psi_1^e(x)$  inicia com um valor nulo no ponto 1 e termina com um valor unitário no ponto 2, a função  $\psi_2^e(x)$  inicia com um valor unitário no ponto 1 e termina com um valor nulo no ponto 2.

## 4 OTIMIZAÇÃO NÃO-LINEAR

Neste Capítulo são abordados os princípios básicos dos métodos de otimização, utilizados para a busca da configuração ótima de um sistema, destacando a otimização por algoritmos genéticos (AG), classificada como um método de busca estocástico. Neste trabalho, a busca por AG combinada com Programação Não-Linear (PNL) é utilizada para minimizar a função objetivo  $E(\mathbf{T}_d)$ .

### 4.1 PRINCÍPIOS DE OTIMIZAÇÃO NÃO-LINEAR

Otimização pode ser definida como um processo iterativo que busca uma solução ótima de um problema, satisfazendo um conjunto de critérios pré-estabelecidos. Considerando um conjunto no espaço Euclidiano  $R^{nvp}$ , onde  $nvp$  é o número total de variáveis de projeto, a otimização de um projeto pode ser realizada através da minimização ou da maximização de uma função objetivo  $f(\mathbf{x})$ , sendo  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{nvp})$  um vetor de variáveis de projeto, pertencente a um espaço de busca viável, com o objetivo de atingir o ponto ótimo  $\mathbf{x}^*$  (ARORA, 2017).

Matematicamente, um problema de otimização, definido em um espaço Euclidiano de dimensão  $nvp$ , pode ser colocado em um formato padrão como

$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_{nvp}), \quad (10)$$

e que pode estar sujeito a  $p$  funções de restrições de igualdade

$$h_i(\mathbf{x}) = h_i(x_1, x_2, \dots, x_{nvp}) = 0, \quad i = 1 \text{ a } p, \quad (11)$$

e a  $q$  funções de restrições de desigualdade

$$g_j(\mathbf{x}) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_{nvp}) \leq 0, \quad j = 1 \text{ a } q. \quad (12)$$

Entre os diversos métodos encontrados na literatura que possibilitam encontrar o ponto de ótimo de um problema de otimização, a busca por AG combinada com PNL é adotada neste trabalho.

Neste trabalho, a busca por AG é empregada pelo fato desse método permitir a otimização de um problema com muitas variáveis simultaneamente em diversas regiões viáveis e pela praticidade de implementação. Para complementar, a PNL é utilizada de forma combinada por conta da redução do número de interações, reduzindo o tempo de processamento.

## 4.2 OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMOS GENÉTICOS

A otimização por AG pode ser classificada como um método de busca estocástica, que visa encontrar uma solução aproximada para um vetor de variáveis de projeto localizado dentro de um espaço de busca pré-definido. As etapas computacionais do AG são baseadas na geração de valores randômicos, mas a geração de novos indivíduos no espaço é conduzida probabilisticamente pela teoria da evolução proposta por Charles Darwin (ARORA, 2017; SIVANANDAM; DEEPA, 2008).

O método de otimização por AG agrega algumas vantagens como (ZINI, 2009):

- Realiza buscas simultâneas em diversas regiões viáveis pelo fato de utilizar uma população em vez de tratar de um único ponto;
- Não precisa de um conhecimento matemático aprofundado do problema considerado;
- Otimiza problemas com muitas variáveis simultaneamente;
- Não necessita de cálculos que envolvam gradientes das funções objetivo e das funções de restrições, o que pode ter um custo alto do ponto de vista computacional;
- Otimiza parâmetros de funções complicadas evitando parar em mínimos locais;
- Praticidade e facilidade de implementação.

Por outro lado, há algumas desvantagens na utilização desse método de otimização como (ZINI, 2009):

- O método possibilita a obtenção um vetor que somente aproxima a solução ótima global do problema;

- É preciso muitas avaliações da função de aptidão;
- Dependendo do tipo de problema de otimização, o tempo de busca pode ser excessivamente longo.

#### 4.2.1 Codificação Binária

No processo de busca por algoritmos genéticos, os indivíduos, originalmente representados por números reais, são codificados para a forma de vetores binários, onde cada elemento de um vetor significa a ausência (0) ou a presença (1) de uma determinada característica. Dessa forma, um indivíduo pode ser formado por um conjunto de variáveis de projeto, sendo que cada variável é codificada em um vetor binário. A codificação binária converte uma variável de projeto, correspondente a um número real, em um vetor composto por elementos 0 e 1 (ARORA, 2017).

#### 4.2.2 Operadores Genéticos

Basicamente, AG padrão é baseado na teoria da evolução natural de Darwin, visto que sua implementação é centrada na aplicação de operadores genéticos. A ideia inicial da aproximação é gerar um conjunto de pontos randomicamente, com o uso de valores permissíveis dentro do espaço de busca. Com base nesse conjunto de pontos, os quais caracterizam um indivíduo, colocados em forma binária (similar a um cromossomo), um novo conjunto de pontos é selecionado randomicamente com uma tendência aos membros mais aptos, de modo que a aptidão média seja melhorada. Como os membros mais aptos do conjunto são usados para gerar novas soluções, os conjuntos sucessivos têm uma probabilidade maior de ter soluções com valores mais adequados. O processo continua até atingir um critério de parada pré-estabelecido ou exceder um limite máximo de iterações especificado. Durante o processamento do algoritmo, três operadores genéticos principais são usados para acompanhar esse trabalho: reprodução, cruzamento e mutação (ARORA, 2017).

O operador de reprodução seleciona um conjunto de membros da população atual e carrega para a próxima geração de acordo com a sua aptidão. Essa combinação garante que os indivíduos mais aptos sobrevivam, gerando assim, indivíduos descendentes mais aptos.

O operador de cruzamento permite que os membros selecionados da nova população possam permutar entre si suas características. O cruzamento envolve a seleção randômica de posições de um par de um vetor binário e, com isso, a permutação dessas posições, formada por uma sequência binária (0 e 1), entre os vetores binários selecionados, conforme apresentada na TABELA 1.

TABELA 1 - REPRESENTAÇÃO DO CRUZAMENTO

	Antes do cruzamento			Depois do cruzamento		
Indivíduo 01	0	1	0	0	1	1
Indivíduo 02	1	0	1	1	1	0

FONTE: O autor (2020).

O operador de mutação seleciona os membros da população, nos quais os vetores binários sofrem permutação randômica de suas posições com valores binários, ou seja, troca-se 0 por 1 ou 1 por 0 nas posições selecionadas aleatoriamente conforme apresentada na TABELA 2.

TABELA 2 - REPRESENTAÇÃO DO OPERADOR DE MUTAÇÃO

Antes da mutação	0	0	0	1	1
Depois da mutação	0	0	1	1	1

FONTE: O autor (2020).

#### 4.2.3 Aplicação da AG em ambiente *Matlab*

A busca por AG pode ser empregada com a utilização do *software MatLab®*, aplicando a função *ga*, onde é criado uma estrutura de otimização. Com a execução do algoritmo, a busca é processada até atingir um ponto ótimo global aproximado, conforme as condições estabelecidas.

### 4.3 PROGRAMAÇÃO NÃO-LINEAR

No processo de otimização, a PNL é um processo que visa solucionar problemas não-lineares com funções multivariáveis contínuas com restrições. A PNL pode ser aplicada de forma combinada com outro processo de otimização como, por exemplo, a busca por AG. As principais vantagens da utilização da PNL em relação ao AG que justificam a sua implementação são:

- Necessidade de menos interações;
- Melhor precisão do ótimo encontrado;
- Redução do tempo de processamento em relação à busca por AG.

#### 4.3.1 Aplicação da PNL em ambiente *Matlab*

O conjunto de rotinas da PNL pode ser implementado através da utilização do *software MatLab®* com a aplicação da função *fmincon*, gerando uma estrutura de otimização e executando-a. Assim, é possível solucionar o problema de otimização, encontrando, de forma aproximada, o mínimo global de uma função multivariável não-linear com restrição.

No ambiente *matlab*, a função *fmincon* utiliza o método dos multiplicadores de Lagrange. Neste método, um gradiente é aplicado na função objetivo, conforme a equação

$$\nabla f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*,) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \quad (13)$$

onde  $f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*,)$  é uma função com  $n$  variáveis,  $g_i(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  são as  $i$ -ésimas funções de restrição e  $\lambda_i$  são os  $i$ -ésimos multiplicadores de Lagrange.

## 5 ESTATÍSTICA APLICADA

Neste Capítulo são apresentados alguns princípios básicos de estatística, a análise da variância, a análise de resíduos e a raiz do erro quadrático médio.

### 5.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA

Estatística é um ramo da ciência que utiliza teorias probabilísticas para avaliar o comportamento das respostas extraídas de experimentos, permitindo mensurar a aleatoriedade dos valores obtidos e, com isso, prever fenômenos que possam influenciar nessas respostas. As respostas oriundas de experimentos são coletadas, analisadas e interpretadas. Com isso, as características das fontes são avaliadas, possibilitando alcançar soluções aproximadas para determinados problemas estatísticos (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Os métodos estatísticos são utilizados, por exemplo, com o objetivo de compreender como um fenômeno não produz o mesmo resultado quando examinado inúmeras vezes, ou seja, existe uma variabilidade nas respostas extraídas de experimentos. Nesse sentido, pode-se estabelecer um intervalo no qual provavelmente as respostas estão presentes (APÊNDICE G). Quando é examinado como uma resposta pode apresentar valores distintos, analisam-se os fatores que podem influenciar o aumento ou a diminuição dessa resposta. Esses fatores representam fontes potenciais de variabilidade no sistema e, com base nas concepções estatísticas, podem-se identificar quais fontes são mais importantes (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

O planejamento experimental compreende um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis sobre os resultados de um processo. Entre os planejamentos experimentais, está o planejamento fatorial de efeitos fixos, em que são realizadas variações pré-determinadas nas variáveis controláveis do processo. A partir das respostas obtidas, é possível decidir quais variáveis são as maiores responsáveis pelas mudanças observadas. Na prática é comum fazer essas alterações em algum fator para analisar como a sua mudança pode alterar ou não a variável resposta. Como vantagens, o planejamento fatorial pode avaliar dois ou mais fatores em dois ou mais níveis, e analisar os seus efeitos (APÊNDICE F). Apesar de muitos fenômenos físicos

podem ser compreendidos analítica ou numericamente, normalmente é necessário realizar experimentos físicos para constatá-los (CASELLA; BERGER, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

## 5.2 ANÁLISE DA VARIÂNCIA

Os experimentos fatoriais simples são aqueles que possuem apenas uma variável e têm como propósito realizar comparações entre dois ou mais tratamentos (níveis atribuídos a um único fator), analisando a homogeneidade<sup>1</sup> das variáveis respostas em estudo. No planejamento fatorial, a Análise da Variância (ANOVA) é uma técnica que compara a variabilidade das amostras, baseada na análise das variâncias amostrais. Nessa técnica, são avaliadas as variações das respostas dentro das amostras, as quais são denominadas variações aleatórias, e as variações das respostas entre as amostras, as quais são denominadas variações entre os tratamentos (CASELLA; BERGER, 2010). A ANOVA pode ser utilizada para verificar se a diferença das médias entre as amostras tem significância, a partir das análises das variáveis respostas medidas. Os níveis de um fator podem ser denominados de tratamentos e cada tratamento possui “n” observações ou réplicas. Tratando-se de um experimento fatorial simples com “e” tratamentos e, cada tratamento com “n” observações, a forma de calcular os totais das observações e as médias correspondentes dos tratamentos são dadas pela equação

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n} \quad i = 1, 2, \dots, e \quad (14)$$

onde  $y_{ij}$  é a variável aleatória de saída considerando o i-ésimo tratamento e a j-ésima unidade experimental (observação experimental dentro de um tratamento),  $y_{i.}$  denota o total das observações obtidas no i-ésimo tratamento e  $\bar{y}_{i.}$  denota a média correspondente de cada tratamento (TABELA 3). O cálculo do valor total de todas as observações e da média total de todas as observações, pode ser pela equação

---

<sup>1</sup> Homogeneidade estatística: Respostas associadas às categorias de uma das variáveis se comporta de forma homogênea ou semelhante nas diversas classes definidas pelas categorias da outra variável classificatória.

$$y_{..} = \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{en}, \quad (15)$$

onde  $y_{..}$  é o valor total global de todas as observações e  $\bar{y}_{..}$  denota a média global correspondente de todas as observações.

O modelo da Análise da Variância para um experimento fatorial simples é computado a partir da soma de quadrados dos tratamentos, com a aplicação da equação

$$SQE = \frac{\sum_{i=1}^e y_{i.}^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{en}, \quad (16)$$

TABELA 3 - ARRANJO DOS DADOS PARA UM PLANEJAMENTO FATORIAL SIMPLES

Tratamentos	Observações				Totais	Médias
1	$y_{11}$	$y_{12}$	...	$y_{1n}$	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	$y_{21}$	$y_{22}$	...	$y_{2n}$	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
...	...	...	...	...	...	...
e	$y_{e1}$	$y_{e2}$	...	$y_{en}$	$y_{e.}$	$\bar{y}_{e.}$
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

FONTE: O autor (2020).

Para calcular a soma de quadrados residual (SQR), aplica-se a seguinte equação

$$SQR = \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^n \left( y_{ij} - \frac{y_{i.}}{n} \right)^2, \quad (17)$$

e para calcular a soma de quadrados total (SQT), pode-se utilizar a equação:

$$SQT = \sum_{i=1}^e \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{en}. \quad (18)$$

Os quadrados médios QME e QMR podem ser obtidos, respectivamente, pela divisão da soma dos quadrados SQE e SQR pelo número de graus de liberdade. Segundo Montgomery e Runger (2012), os graus de liberdade para um experimento fatorial simples são estabelecidos conforme consta no quadro da ANOVA (TABELA 4).

TABELA 4 - QUADRO DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA)

Fonte da Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F calculado
Amostral	SQE	e-1	QME	QME / QMR
Residual	SQR	e(n-1)	QMR	
Total	SQT	en-1		

FONTE: O autor (2020).

Estatística de teste é um valor calculado a partir de uma amostra de dados e o seu valor é usado para determinar a aceitação ou a rejeição de uma determinada hipótese (APÊNDICE H). Na ANOVA (TABELA 4), os valores de F calculados, considerados uma estatística de teste, são comparados com os valores da distribuição F de Snedecor (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005; CASELLA; BERGER, 2010). Os valores de F calculados menores do que os da distribuição F de Snedecor, serão classificados como insignificantes e, os valores de F calculados maiores do que os da distribuição F de Snedecor, serão classificados como significantes.

Outra forma de analisar os fatores significantes é pelo valor-p calculado com base nos dados amostrais e no valor obtido para a estatística F na ANOVA. Considerando um nível de significância de 5%, os fatores que apresentarem um valor-p maior que 5%, serão descartados e os fatores que apresentarem valor-p menor que 5%, serão considerados significativos (CASELLA; BERGER, 2010; MORETTIN; BUSSAB, 2004).

Comparações múltiplas permitem analisar as diferenças entre as médias e estimam em que grau elas são diferentes. A ANOVA possibilita determinar a significância de um fator, porém não informa qual é a correlação entre os níveis dos fatores. Assim, além de identificar a presença ou ausência de significância de um fator, as comparações múltiplas podem identificar também a influência dos níveis dos fatores, a partir da aplicação de um teste de comparação como os de Tukey, Scheffé, Dunnett ou Duncon (CASELLA; BERGER, 2010; MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

### 5.3 ANÁLISE DE RESÍDUOS

Para que uma Análise de Variância seja válida, e os resultados oriundos de experimentos físicos sejam consistentes, é necessário analisar os resíduos. Com base em um teste de hipóteses, verifica-se se há homogeneidade das variâncias dos resíduos, normalidade dos resíduos e independência dos resíduos.

### 5.3.1 Teste de homogeneidade das variâncias dos resíduos

Este teste tem o propósito de verificar se as variâncias nos grupos considerados são homogêneas. Para realizar a análise, são necessárias duas hipóteses, denotadas  $H_0$  e  $H_1$ . Assim, na primeira hipótese

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \dots = \sigma_n^2, \quad (19)$$

as variâncias são homogêneas. Todavia, na segunda hipótese

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \neq \sigma_3^2 \neq \dots \neq \sigma_n^2, \quad (20)$$

as variâncias são heterogêneas.

Para realização desse teste é preciso escolher um nível de significância  $\alpha$  e uma estatística apropriada para efetuar as análises. Existem diversos testes que podem avaliar a homogeneidade das variâncias, sendo que os mais conhecidos são o teste de Bartlett e o teste de Cochran.

Para testar a hipótese pode ser aplicado o teste de Bartlett, na qual  $H_0$  considera as variâncias iguais e  $H_1$  considera que pelo menos duas variâncias se diferem entre si. A estatística de teste  $\chi^2$  para avaliar a hipótese é calculada a partir da equação (BARTLETT, 1937)

$$\chi^2 = \frac{(\sum_i^k n_i - k) \cdot \ln\left(\frac{\sum_i^k (n_i - 1) S_i^2}{\sum_i^k n_i - k}\right) - \sum_i^k (n_i - 1) \cdot \ln(S_i^2)}{1 + \frac{1}{3(k-1)} \left[ \sum_i^k \left(\frac{1}{n_i - 1}\right) - \frac{1}{\sum_i^k n_i - k} \right]}. \quad (21)$$

Considerando que a estatística de teste tenha  $k$  graus de liberdade para efetuar o teste, é analisado se  $\chi^2 > \chi^2_{tabela}$ . Se a estatística de teste for maior que o valor tabelado, para um índice de significância  $\alpha$ , rejeita-se  $H_0$ , constatando que não há homogeneidade das variâncias.

### 5.3.2 Teste de normalidade dos resíduos

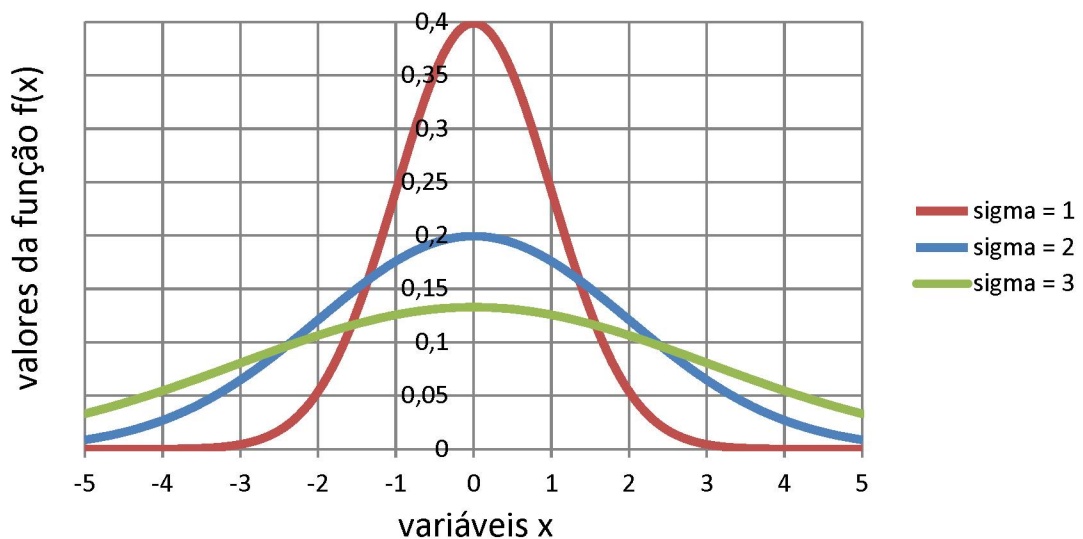
Para analisar a normalidade dos resíduos<sup>2</sup>, existem alguns testes como o teste de Shapiro-Wilk e o teste de Kolmogorov-Smirnov, os quais são os mais utilizados. Para testar a hipótese, são levantadas duas condições em que  $H_0$  considera que há normalidade entre os resíduos e  $H_1$  considera que não há normalidade entre os resíduos.

Para haver uma normalidade entre os resíduos, eles precisam atender uma curva Gaussiana, como mostra a FIGURA 18, na qual os resíduos analisados seguem uma distribuição normal. Para testar por meio de Shapiro-Wilk, é usada uma estatística de teste  $w$  aplicando a equação (SHAPIRO; WILK, 1965)

$$w = \frac{(\sum_i^n a_i \cdot x_{(i)})^2}{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (22)$$

onde  $x_{(i)}$  é a  $i$ -ésima ordem estatística ( $i$ -ésimo menor número na amostra),  $x_i$  é o  $i$ -ésimo número na amostra,  $\bar{x}$  é a média da amostra e o  $n$  é o número de experimentos.

FIGURA 18 - FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE UMA DISTRIBUIÇÃO NORMAL.



FONTE: O autor (2020).

<sup>2</sup> Normalidade dos Resíduos: Distribuição de probabilidade dos resíduos pode ser aproximada a uma distribuição gaussiana.

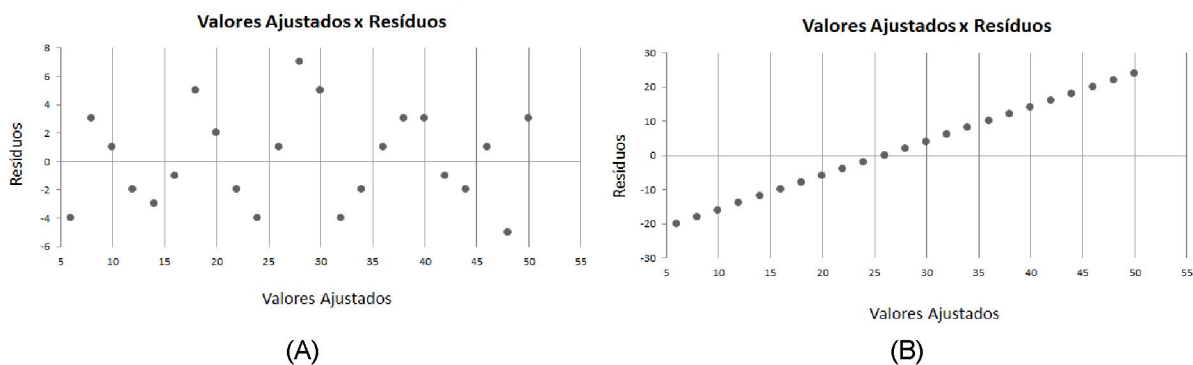
Calculando a estatística de teste  $w$ , compara-se com o valor tabelado e, caso a estatística de teste  $w < w_{tabela}$ , a hipótese  $H_0$  é rejeitada, constatando que não há normalidade dos resíduos.

### 5.3.3 Teste de independência dos resíduos

Considerando que um resíduo é a diferença entre um valor médio estimado e um valor observado, o teste da independência dos resíduos pode ser efetuado através da análise gráfica dos resíduos em função dos valores ajustados.

São estipuladas duas hipóteses através da interpretação gráfica, estabelecendo  $H_0$  para a situação em que há independência dos resíduos e  $H_1$  para a situação em que não há independência dos resíduos. Para haver independência dos resíduos, não pode haver nenhuma tendência, ou seja, o comportamento deve ser aleatório em torno da média, como mostra a FIGURA 19(a). Por outro lado, quando houver um comportamento com uma tendência dos resíduos, como mostra a FIGURA 19(b), há uma dependência dos resíduos. Nota-se que há uma proporcionalidade linear dos resíduos com os valores ajustados apresentados na FIGURA 19(b) (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

FIGURA 19 - VALORES AJUSTADOS EM FUNÇÃO DOS RESÍDUOS: (A) INDEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS (B) DEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS.



FONTE: O autor (2020).

## 5.4 RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO

O erro quadrático médio (MSE) pode ser definido como uma medida da diferença entre o valor esperado e o valor observado de modelos numéricos, conforme a equação mostrada (HALLAK; PEREIRA, 2011)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ps_i - Po_i)^2 \quad (23)$$

onde  $Ps_i$  é o  $i$ -ésimo valor esperado,  $Po_i$  é o  $i$ -ésimo valor observado e  $n$  é o número de experimentos.

Com base no MSE, a raiz do erro quadrático médio (RMSE) pode ser usada para examinar a proximidade que há entre os valores esperados e os valores observados, com a vantagem de apresentar valores nas mesmas dimensões das variáveis analisadas, como mostra a equação

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ps_i - Po_i)^2 \right]^{1/2}. \quad (24)$$

Com isso, é possível utilizar os dados experimentais com valores mais próximos da média estimada, produzindo resultados mais confiáveis.

## 6 METODOLOGIA PROPOSTA PARA O CÁLCULO DO PERFIL DE TR

Este Capítulo tem como propósito apresentar uma metodologia que visa a obtenção de um campo contínuo de TR ao longo da profundidade de um componente mecânico. Para o desenvolvimento desta metodologia, são utilizados o MEF e uma técnica de otimização híbrida, combinando AG e PNL, para obtenção das incógnitas.

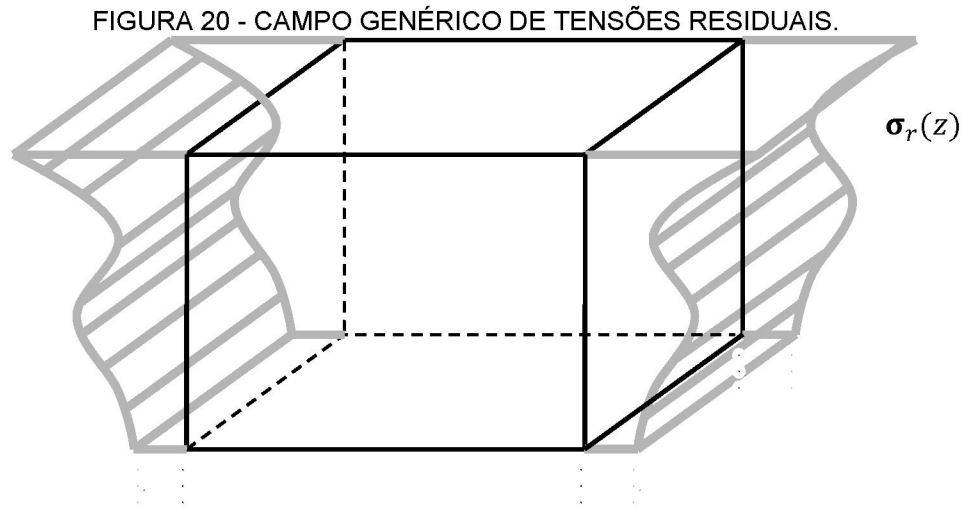
### 6.1 IDEIA CENTRAL DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta neste trabalho se baseia na aplicação de carregamentos externos em um bloco que representa uma pequena região contendo o local da perfuração, com a utilização de um modelo de elementos finitos. Esses carregamentos aplicados induzem perfis de tensões ao longo de sua profundidade. Para cada carregamento, é efetuada uma sequência de furos incrementais com profundidades pré-determinadas, de forma similar ao método do furo cego. À medida que são executados esses furos, são extraídos os valores numéricos das deformações relaxadas. Com isso, as deformações relaxadas identificadas no modelo numérico são comparadas com aquelas obtidas experimentalmente, gerando um erro. Dentro de um processo de otimização, a função “erro” é utilizada como função objetivo e os fatores que caracterizam o campo de tensões residuais são as variáveis de projeto. Esse processo de otimização visa obter os valores característicos ótimos que minimizam a função erro e possibilitam a construção de um campo de TR.

### 6.2 PROCEDIMENTO PARA CALCULAR AS TENSÕES CONTÍNUAS COM BASE EM CARREGAMENTOS DEFINIDOS POR FUNÇÕES DE FORMA

Inicialmente, considere um bloco de material com as mesmas propriedades mecânicas do componente mecânico em análise e sujeito a um campo contínuo de tensões residuais  $\sigma_r(z)$ , como ilustrado na FIGURA 20. Com o objetivo de aproximar esse perfil que descreve o comportamento das TR, é utilizado um conjunto de funções lineares por partes  $\psi_{d_i}(z)$ , similares às funções de forma lineares elementares empregadas no Método dos Elementos Finitos, conforme definidas no Capítulo 03. Essas funções caracterizam os carregamentos a serem aplicados ao modelo

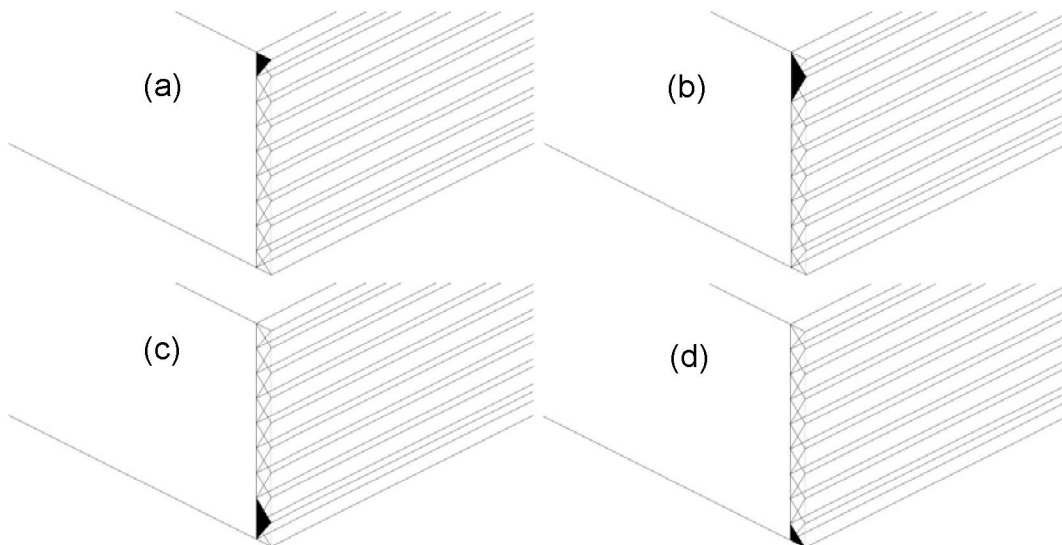
numérico. Neste caso, cada carregamento, definido por uma função de forma  $\psi_{d_i}(z)$ , induz um perfil de tensão  $\sigma_{r_i}(z)$  ao longo da profundidade do bloco.



FONTE: O autor (2020).

Os carregamentos, definidos por funções de forma  $\psi_{d_i}(z)$ , aplicados ao bloco, são mostrados na FIGURA 21. Nessa figura são representados o primeiro  $\psi_{d_1}(z)$ , o segundo  $\psi_{d_2}(z)$ , o penúltimo  $\psi_{d_{n-1}}(z)$  e o último  $\psi_{d_n}(z)$  carregamentos, respectivamente, como ilustram as FIGURAS 21(a), 21(b), 21(c) e 21(d). Nesse caso,  $n$  corresponde ao número total de carregamentos.

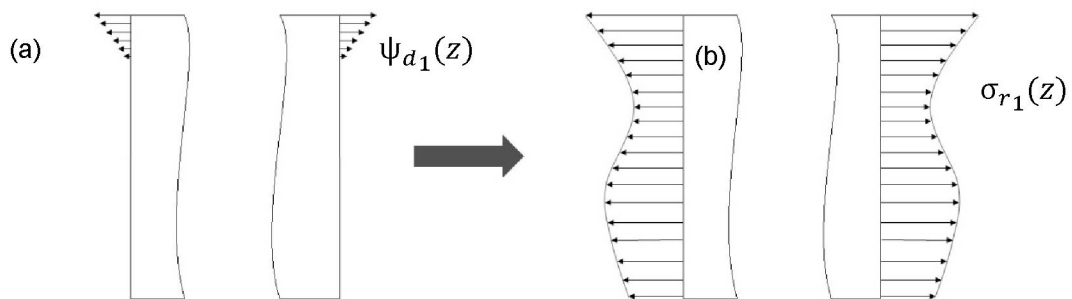
FIGURA 21 - CARREGAMENTOS DEFINIDOS POR FUNÇÕES DE FORMA: (a) FUNÇÃO  $\psi_{d_1}(z)$ , (b) FUNÇÃO  $\psi_{d_2}(z)$ , (c) FUNÇÃO  $\psi_{d_{n-1}}(z)$  e (d) FUNÇÃO  $\psi_{d_n}(z)$ .



FONTE: O autor (2020).

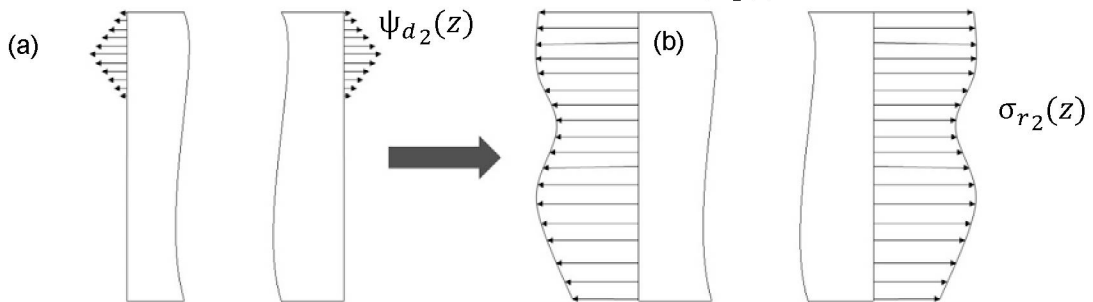
Essas tensões unitárias definidas pelas funções de forma  $\psi_{d_i}(z)$ , as quais são aplicadas externamente, variam linearmente de 0 a 1 e/ou de 1 a 0 (FIGURA 21). Porém, para cada uma dessas tensões unitárias, um perfil de tensão desconhecido é gerado internamente devido aos carregamentos aplicados. O primeiro carregamento  $\psi_{d_1}(z)$  induz um perfil de tensões, denotado  $\sigma_{r_1}(z)$ , como mostrado na FIGURA 22. O segundo carregamento  $\psi_{d_2}(z)$ , como mostrado na FIGURA 23, induz o mesmo efeito e assim sucessivamente até o penúltimo e o último carregamentos, como apresentam a FIGURA 24 e a FIGURA 25, respectivamente.

FIGURA 22 - PERFIL DE TENSÃO  $\sigma_{r_1}(z)$  (b) INDUZIDO PELO PRIMEIRO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA  $\psi_{d_1}(z)$  (a).



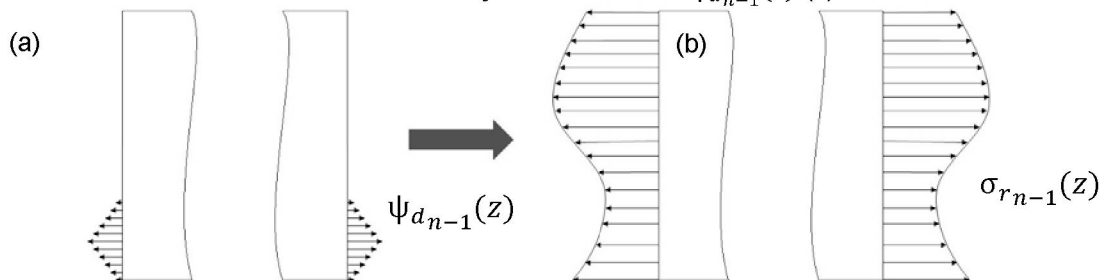
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 23 - PERFIL DE TENSÃO  $\sigma_{r_2}(z)$  (b) INDUZIDO PELO SEGUNDO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA  $\psi_{d_2}(z)$  (a).



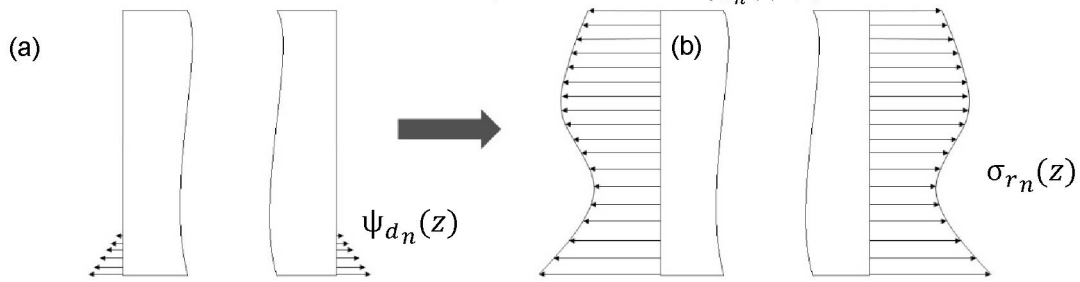
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 24 - PERFIL DE TENSÃO  $\sigma_{r_{n-1}}(z)$  (b) INDUZIDO PELO PENÚLTIMO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA  $\psi_{d_{n-1}}(z)$  (a).



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 25 - PERFIL DE TENSÃO  $\sigma_{r_n}(z)$  (b) INDUZIDO PELO ÚLTIMO CARREGAMENTO BASEADO NA FUNÇÃO DE FORMA  $\psi_{d_n}(z)$  (a).



FONTE: O autor (2020).

Com o intuito de obter uma aproximação contínua para o campo de TR, a partir dos perfis de tensão  $\sigma_{r_i}(z)$ , definem-se os fatores  $T_{d_i}(z)$  que correspondem aos amplificadores dos perfis, como mostra a FIGURA 26, onde o índice  $d$  ( $d = x, y$  ou  $xy$ ) indica as direções onde estão atuando as tensões. Assim, considerando que o sistema mecânico em estudo é linear<sup>3</sup> e isotrópico, tem-se que o perfil resultante de TR é composto pelo somatório de todas as funções  $\sigma_{r_i}(z)$  multiplicadas pelos seus fatores  $T_{d_i}(z)$ , e pode ser escrito como

$$\sigma_r(z) = \sum_{i=1}^n T_{d_i} \sigma_{r_i}(z). \quad (25)$$

Para a realização do procedimento numérico, com o propósito de obter o perfil de TR, é necessário definir a quantidade de furos incrementais a serem executados. Para um dado furo  $j$ -ésimo, com profundidade  $h_j$ , tem-se três deformações relaxadas ( $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_B$  e  $\varepsilon_C$ ), medidas em cada extensômetro na superfície do componente modelado (FIGURA 20), considerando um estado plano de tensões. O vetor  $\mathbf{h}$  corresponde às profundidades dos furos, ou seja, às distâncias entre a superfície do componente e os níveis de perfurações é dado por

$$\mathbf{h} = \{h_1, h_2, \dots, h_{nf}\}, \quad (26)$$

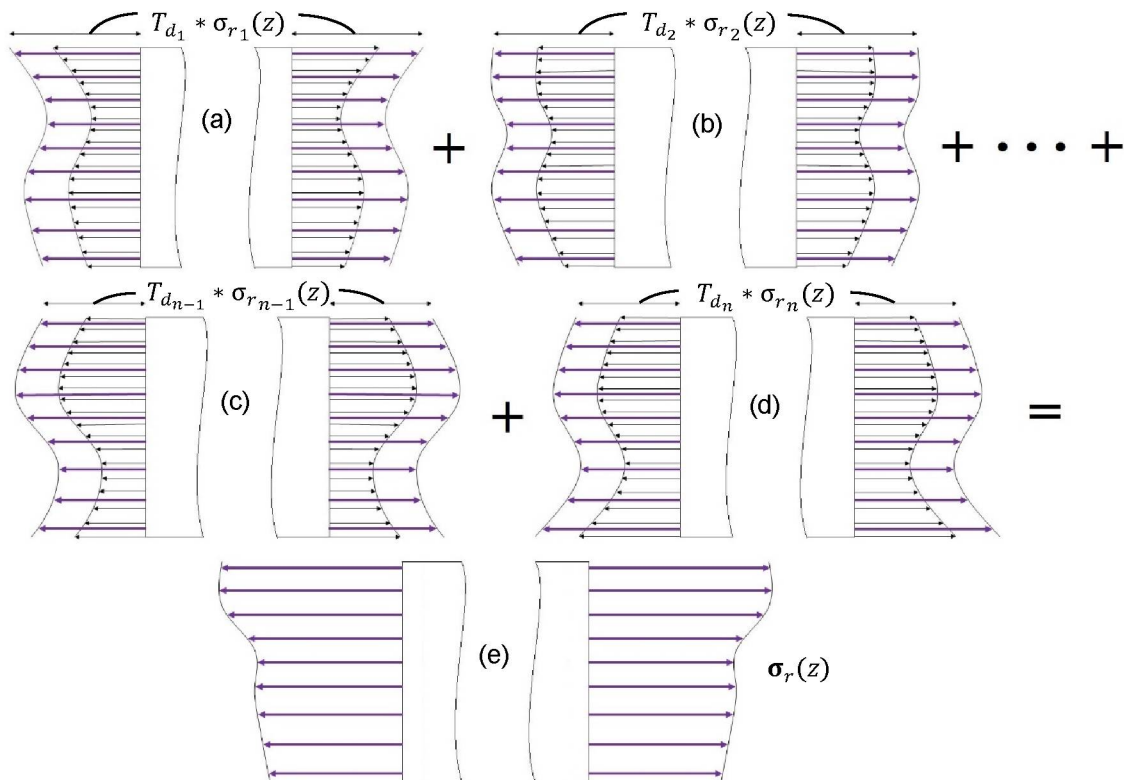
sendo  $nf$  o número total de furos. Assim, cada incremento de perfuração pode ser definido como

<sup>3</sup> As condições da teoria da elasticidade linear são válidas quando as deformações são relativamente pequenas e quando as relações entre as deformações e as tensões são linearmente proporcionais.

$$\Delta h_j = h_j - h_{j-1}, \quad (27)$$

onde  $\Delta h_j$  é o incremento de cada furo e  $h_j$  é sua profundidade do  $j$ -ésimo incremento (FIGURA 27). A norma ASTM E 837-13 (2013) recomenda um valor único para o incremento na profundidade dos furos ( $\Delta h_j = 0,05 \text{ mm}$ ). Assim,  $h_0 = 0 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 0,05 \text{ mm}$ ;  $h_2 = 0,10 \text{ mm}$ ; ...;  $h_{nf} = 0,5 \times nf \text{ mm}$ , onde “ $nf$ ” é o número total de furos.

FIGURA 26 - SUPERPOSIÇÃO DOS CARREGAMENTOS COM OS FATORES MULTIPLICADORES INTRODUZIDOS. (a) PRIMEIRO. (b) SEGUNDO. (c) PENÚLTIMO. (d) ÚLTIMO. (E) PERFIL RESULTANTE DA SUPERPOSIÇÃO DOS CARREGAMENTOS.



FONTE: O autor (2020).

Considerando que o campo de TR, em geral, não é constante ao longo da profundidade, propõe-se desenvolver uma metodologia para obtenção do perfil de TR não-uniforme e contínuo ao longo da profundidade do componente analisado. Nesse problema, as incógnitas são os componentes dos vetores  $T_x$ ,  $T_y$  e  $T_{xy}$ , os quais correspondem aos amplificadores dos campos de TR normais nas direções  $x$  e  $y$  e de cisalhamento no plano definido pelos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente. Estes vetores são dados explicitamente por

$$\mathbf{T}_x = \{T_{x_1}, T_{x_2}, \dots, T_{x_n}\}, \quad (28)$$

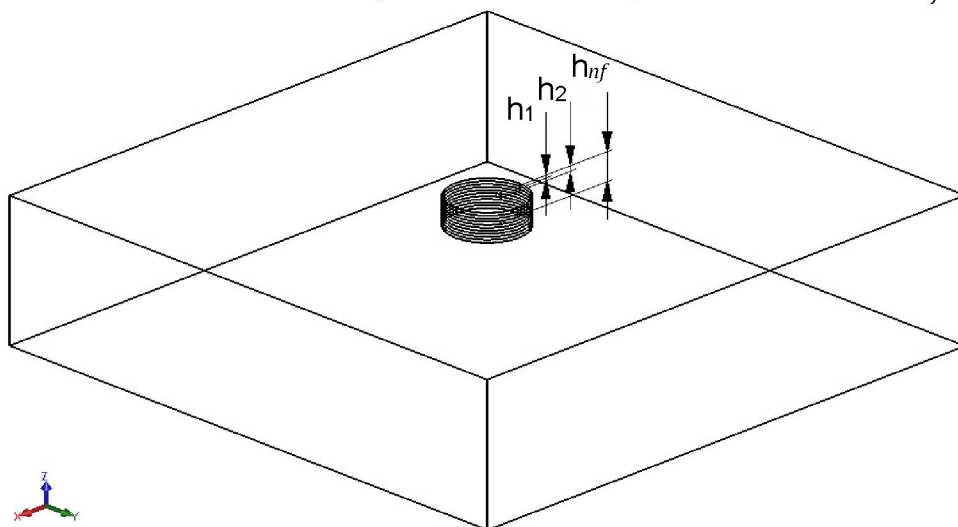
$$\mathbf{T}_y = \{T_{y_1}, T_{y_2}, \dots, T_{y_n}\} \quad (29)$$

e

$$\mathbf{T}_{xy} = \{T_{xy_1}, T_{xy_2}, \dots, T_{xy_n}\}. \quad (30)$$

onde  $n$  é o número de fatores vinculados aos perfis de tensões devido aos carregamentos aplicados.

FIGURA 27 - REPRESENTAÇÃO DAS PERFURAÇÕES INCREMENTAIS  $h_j$ .



FONTE: O autor (2020).

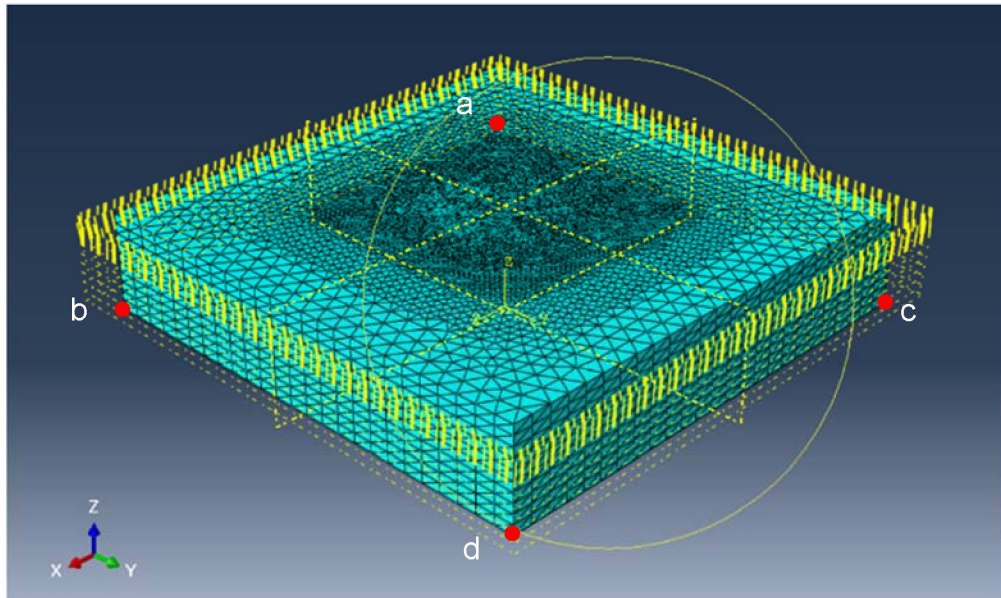
Com o propósito de solucionar esse problema de otimização, as próximas seções apresentam uma formulação considerando um campo de TR normal na direção  $x$ , um campo de TR normal na direção  $y$ , um campo de TR cisalhantes no plano definido pelas direções  $x$  e  $y$  e, subseqüentemente, um campo resultante da superposição dessas TR.

### 6.3 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Com o uso de um *software* de simulação numérica (*Abaqus*® 6.12), que utiliza o MEF, um bloco de elementos finitos (FIGURA 28) com 25 mm de largura, 25 mm de comprimento e 5 mm de espessura foi modelado. Considerando um estado plano de tensões, foram aplicados carregamentos nas faces externas do bloco de elementos finitos, como ilustrado na FIGURA 21, e medidas as deformações nas regiões demarcadas, considerando a geometria de uma roseta do tipo B (FIGURA 29), na

superfície do bloco. As propriedades da malha de elementos finitos constam na TABELA 5 e as condições de contorno do modelo de elementos finitos estão explicitadas na TABELA 6.

FIGURA 28 - MODELO DE ELEMENTOS FINITOS.



FONTE: O autor (2020).

TABELA 5 - PROPRIEDADES DA MALHA CONSTRUÍDA

Tipo de Elemento	Tetraedro Linear
Comprimento máximo das arestas dos elementos	1,00 mm
Comprimento mínimo das arestas dos elementos	0,05 mm
Número total de elementos finitos do modelo	614.673
Número total de nós do modelo	201.363

FONTE: O autor (2019).

TABELA 6 - CONDIÇÕES DE CONTORNO.

Vértice	Deslocamentos
a	$u_x = 0; u_y = 0; u_z = 0.$
b	$u_y = 0; u_z = 0.$
c	$u_x = 0; u_z = 0.$
d	$u_z = 0.$

FONTE: O autor (2019).

Na superfície do modelo geométrico, são lidas as deformações longitudinais em três direções radiais nas regiões demarcadas (FIGURA 29).



#### 6.4 APROXIMAÇÃO DA DEFORMAÇÃO LONGITUDINAL NA DIREÇÃO RADIAL POR SÉRIE DE FOURIER

A aproximação proposta é utilizada na metodologia para calcular as deformações longitudinais em uma direção radial qualquer a partir das deformações medidas, tanto por MEF como por experimentos físicos.

Na física, existem diversos fenômenos cujas funções podem ser escritas utilizando funções periódicas, como a Série de Fourier (SF), quando envolver fenômenos cíclicos. Por meio de SF, uma função periódica qualquer  $f(\theta)$  pode ser representada através de funções trigonométricas compostas por senos e cossenos em função da variável  $\theta$ , de acordo com a equação (KREYSZIG, 2009; ZILL; CULLEN, 2009)

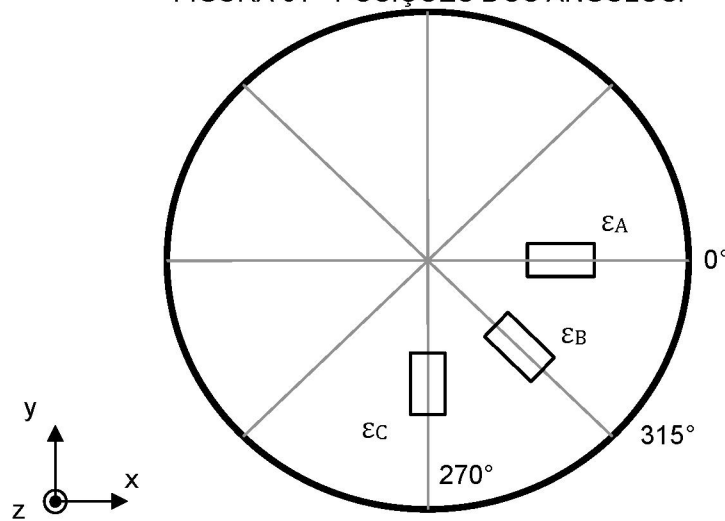
$$f(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos(i\theta) + b_i \text{sen}(i\theta). \quad (31)$$

onde  $a_0$  é a constante inicial independente que compõe a Série de Fourier,  $a_i$  é a constante  $i$ -ésima associada à função cosseno e  $b_i$  é a constante  $i$ -ésima associada à função seno.

Em um ponto da superfície do componente mecânico em análise, cujo plano tangente é definido pelas direções tangenciais  $x$  e  $y$ , são alocados os extensômetros. Neste caso, para uma mesma coordenada radial (raio constante), a deformação longitudinal nessa direção possui simetria tanto em relação ao plano  $xz$ , como em relação ao plano  $yz$  (FIGURA 31). Assim, considerando que as funções, usadas para representar as deformações, são funções  $\pi$ -periódicas, de forma que  $f(\theta) = f(\theta + \pi)$ , os coeficientes ímpares de  $a_i$  e  $b_i$  são nulos, ou seja,  $a_1 = b_1 = a_3 = b_3 = \dots = 0$ . Com isso, a equação (31) pode ser simplificada para

$$f(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} [a_{2i} \cos(2i\theta) + b_{2i} \text{sen}(2i\theta)]. \quad (32)$$

FIGURA 31 - POSIÇÕES DOS ÂNGULOS.



FONTE: O autor (2020).

A função  $f(\theta)$ ,  $\pi$ -periódica, pode ser usada para representar as deformações longitudinais nas direções radiais, denotadas  $\varepsilon_d(\theta)$  ( $d = x, y$  ou  $xy$ ), para qualquer ângulo  $\theta$  e para um valor de raio constante, em torno do centro de um furo. Ademais, esta função pode representar tanto as deformações obtidas numericamente como aquelas obtidas experimentalmente como

$$\varepsilon_d(\theta) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} [a_{2i} \cos(2i\theta) + b_{2i} \sin(2i\theta)]. \quad (33)$$

A função  $\varepsilon_d(\theta)$  é utilizada para calcular o valor da deformação para qualquer ângulo  $\theta$ , utilizando os coeficientes  $a_0, a_2, b_2, \dots, a_n, b_n$ . Como no método do furo cego as rosetas mais comuns (Tipo A e Tipo B) usam apenas três extensômetros, e são necessários apenas três coeficientes para representar as deformações na superfície de um componente. Com isso, pode-se reduzir a equação para a forma

$$\varepsilon_d(\theta) = a_0 + a_2 \cos(2\theta) + b_2 \sin(2\theta). \quad (34)$$

Para determinar os valores dos coeficientes dessa equação, é necessário estipular três posições angulares ( $\theta_A, \theta_B$  e  $\theta_C$ ), nas quais são instalados os extensômetros de medição orientados na direção radial e alocados sobre o plano analisado. Assim, sem perder generalidade, são definidas as deformações  $\varepsilon_A, \varepsilon_B$  e  $\varepsilon_C$

(FIGURA 31). Fazendo as substituições dos três valores dos ângulos na equação 34, são obtidas três equações com três incógnitas. Solucionando esse sistema, têm-se os coeficientes dado por

$$a_0 = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2}, \quad a_2 = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_C}{2} \quad \text{e} \quad b_2 = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2} - \varepsilon_B. \quad (35)$$

Substituindo os coeficientes  $a_0$ ,  $a_2$  e  $b_2$  na equação 34, tem-se a função de deformação aproximada  $\varepsilon_d(\theta)$  para qualquer ângulo  $\theta$  provocado por uma série de carregamentos na forma

$$\varepsilon_d(\theta) = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C}{2} + \left(\frac{\varepsilon_A - \varepsilon_C}{2}\right) \cos(2\theta) + \left(\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_C - 2 \cdot \varepsilon_B}{2}\right) \text{sen}(2\theta). \quad (36)$$

Essa função pode ser usada para representar os valores de deformações obtidos numericamente,

$$\begin{aligned} \varepsilon_d^{MEF}(\theta) = & \left(\frac{\varepsilon_A^{MEF} + \varepsilon_C^{MEF}}{2}\right) + \left(\frac{\varepsilon_A^{MEF} - \varepsilon_C^{MEF}}{2}\right) \cos(2\theta) \\ & + \left(\frac{\varepsilon_A^{MEF} + \varepsilon_C^{MEF} - 2 \cdot \varepsilon_B^{MEF}}{2}\right) \text{sen}(2\theta) \end{aligned} \quad (37)$$

e para representar os valores obtidos a partir de experimentos físicos,

$$\begin{aligned} \varepsilon_d^{EXP}(\theta) = & \left(\frac{\varepsilon_A^{EXP} + \varepsilon_C^{EXP}}{2}\right) + \left(\frac{\varepsilon_A^{EXP} - \varepsilon_C^{EXP}}{2}\right) \cos(2\theta) \\ & + \left(\frac{\varepsilon_A^{EXP} + \varepsilon_C^{EXP} - 2 \cdot \varepsilon_B^{EXP}}{2}\right) \text{sen}(2\theta). \end{aligned} \quad (38)$$

#### 6.4.1 Deformações decorrentes do campo de tensões residuais na direção x

Com a aplicação dos carregamentos externos na direção x via o MEF, para cada incremento de furo  $j$ , conforme ilustram as FIGURAS 22, 23, 24 e 25, as deformações na superfície do componente são analisadas. A deformação longitudinal na direção radial, denotada  $\varepsilon_{rx}$  (FIGURA 32), composta pelos elementos  $\varepsilon_{rx_i}$ , depende de uma orientação  $\theta$  e de  $T_x$ . Assim, a deformação longitudinal resultante

( $\varepsilon_{rx}$ ) pode ser calculada em função do ângulo  $\theta$  e em função do vetor de parâmetros associados à tensão residual na direção  $x$ ,  $\mathbf{T}_x$ , dada por

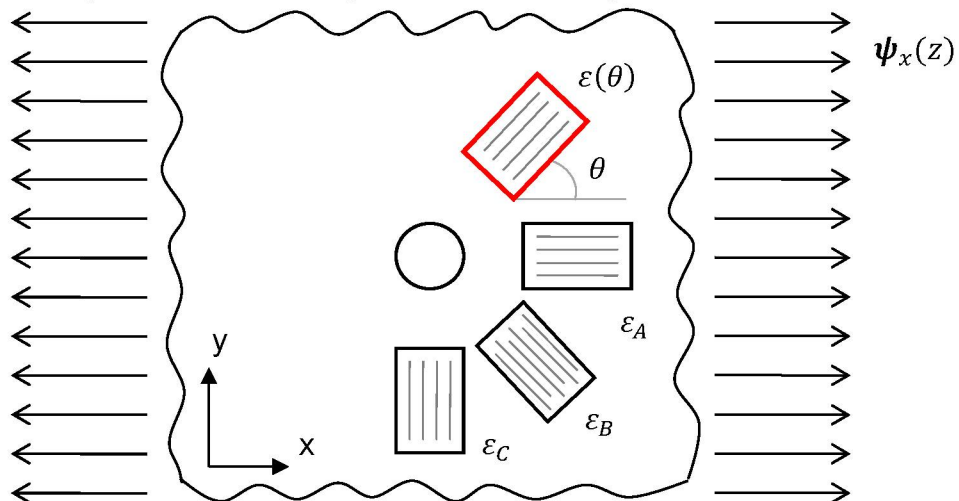
$$\varepsilon_{rx}(\theta, \mathbf{T}_x) = \sum_{i=1}^{nc} T_{x_i} \cdot \varepsilon_{rx_i}(\theta), \quad (39)$$

onde o elemento  $\varepsilon_{rx_i}$  corresponde à função de deformação longitudinal decorrente do  $i$ -ésimo carregamento e  $T_{x_i}$  é o  $i$ -ésimo elemento do vetor  $\mathbf{T}_x$ . Realizando o mostrado pela equação (39), tem-se a função de deformação longitudinal na direção radial decorrente do perfil de TR na direção  $x$ . Assim, expandindo a equação (39) e aplicando-a às deformações lidas no modelo de elementos finitos, obtém-se

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rx}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_x) = \sum_{i=1}^{nc} T_{x_i} \cdot \left[ \left( \frac{\varepsilon_{Ax}^{MEF} + \varepsilon_{Cx}^{MEF}}{2} \right) + \left( \frac{\varepsilon_{Ax}^{MEF} - \varepsilon_{Cx}^{MEF}}{2} \right) \cos(2\theta) \right. \\ \left. + \left( \frac{\varepsilon_{Ax}^{MEF} + \varepsilon_{Cx}^{MEF} - 2 \cdot \varepsilon_{Bx}^{MEF}}{2} \right) \sin(2\theta) \right], \quad (40) \end{aligned}$$

sendo que  $\varepsilon_{rx}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_x)$  corresponde à deformação longitudinal na direção radial e posição circunferencial geométrica  $\theta$  decorrente dos carregamentos aplicados na direção  $x$ .

FIGURA 32 - TENSÕES RESIDUAIS BASEADAS EM FUNÇÕES DE FORMA APLICADAS NA DIREÇÃO X PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.



FONTE: O autor (2020).

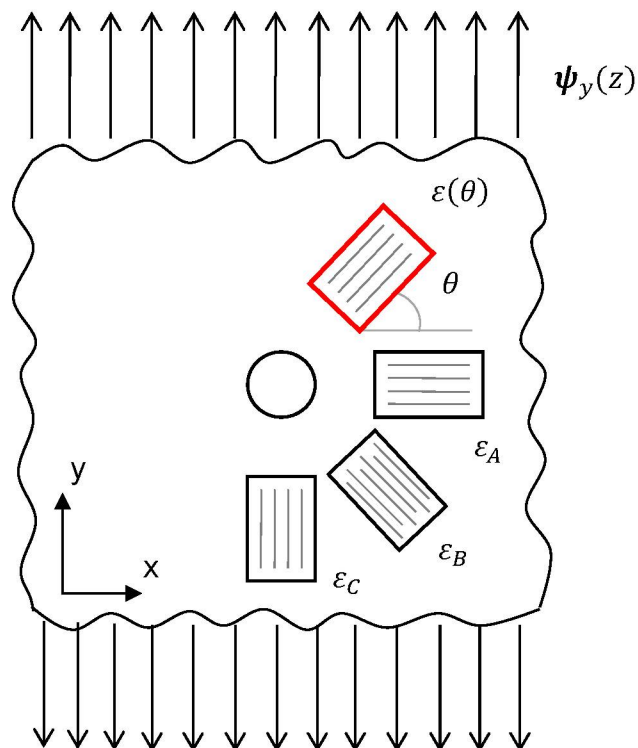
#### 6.4.2 Deformações decorrente do campo de tensões residuais na direção y

Como apresentado na seção anterior, o mesmo procedimento pode ser realizado para a direção y, onde são aplicados carregamentos na direção y, para cada incremento de furo  $j$ , conforme ilustram as FIGURAS 22, 23, 24 e 25. Assim, a função de deformação longitudinal na direção radial  $\varepsilon_{ry}$  (FIGURA 33) em função do ângulo  $\theta$  e do vetor de parâmetros  $\mathbf{T}_y$  é dada por

$$\varepsilon_{ry}(\theta, \mathbf{T}_y) = \sum_{i=1}^{nc} T_{yi} \cdot \varepsilon_{ry_i}(\theta), \quad (41)$$

onde o elemento  $\varepsilon_{ry_i}$  corresponde à função de deformação longitudinal decorrente do i-ésimo carregamento e  $T_{yi}$  o i-ésimo elemento do vetor  $\mathbf{T}_y$ .

FIGURA 33 - TENSÕES RESIDUAIS BASEADAS EM FUNÇÕES DE FORMA APLICADAS NA DIREÇÃO Y PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.



FONTE: O autor (2020).

Assim, expandindo o termo (40) para a deformação radial, obtém-se

$$\varepsilon_{ry}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_y) = \sum_{i=1}^{nc} T_{yi} \cdot \left[ \left( \frac{\varepsilon_{Ay}^{MEF} + \varepsilon_{Cy}^{MEF}}{2} \right) + \left( \frac{\varepsilon_{Ay}^{MEF} - \varepsilon_{Cy}^{MEF}}{2} \right) \cos(2\theta) + \left( \frac{\varepsilon_{Ay}^{MEF} + \varepsilon_{Cy}^{MEF} - 2 \cdot \varepsilon_{By}^{MEF}}{2} \right) \sin(2\theta) \right], \quad (42)$$

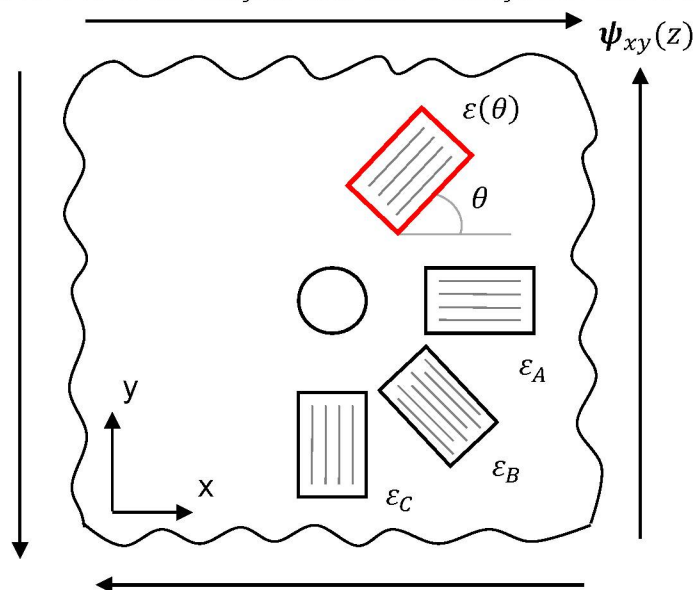
sabendo que  $\varepsilon_{ry}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_y)$  corresponde à deformação longitudinal devido aos carregamentos aplicados  $\psi_y(z)$  na direção y.

#### 6.4.3 Deformações decorrentes do campo de tensões residuais na direção xy

Um procedimento semelhante é realizado para calcular a função deformação  $\varepsilon_{rxy}$  (FIGURA 34), onde são aplicadas tensões cisalhantes no modelo, para cada incremento de furo  $j$ . Observa-se que a função  $\varepsilon_{rxy_i}$  corresponde a deformação longitudinal devido ao  $i$ -ésimo carregamento cisalhante. Com isso, a deformação longitudinal na direção radial em função do ângulo  $\theta$  e do vetor  $\mathbf{T}_{xy}$  é dada por

$$\varepsilon_{rxy}(\theta, \mathbf{T}_{xy}) = \sum_{i=1}^{nc} T_{xy_i} \cdot \varepsilon_{rxy_i}(\theta). \quad (43)$$

FIGURA 34 - TENSÕES RESIDUAIS BASEADAS EM FUNÇÕES DE FORMA APLICADAS NO PLANO XY PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.



FONTE: O autor (2020).

Como nos casos anteriores, realizando a expansão da função, obtém-se

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rxy}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_{xy}) = & \\ \sum_{i=1}^{nc} T_{xyi} \cdot & \left[ \left( \frac{\varepsilon_{Axy}^{MEF} + \varepsilon_{Cxy}^{MEF}}{2} \right) + \left( \frac{\varepsilon_{Axy}^{MEF} - \varepsilon_{Cxy}^{MEF}}{2} \right) \cos(2\theta) \right. \\ & \left. + \left( \frac{\varepsilon_{Axy}^{MEF} + \varepsilon_{Cxy}^{MEF} - 2 \cdot \varepsilon_{Bxy}^{MEF}}{2} \right) \sin(2\theta) \right], \end{aligned} \quad (44)$$

sabendo que  $\varepsilon_{rxy}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_{xy})$  corresponde à deformação longitudinal decorrente dos carregamentos aplicados no modelo. Nesse caso, os carregamentos adjacentes aplicados nas faces externas (paralelo aos planos xz e yz) do modelo induzem uma tensão cisalhante no plano definido pelos eixos x e y.

Com as deformações obtidas via MEF decorrentes dos carregamentos aplicados nas direções mostradas e, considerando um estado plano de tensões, pode-se associar essas deformações por superposição.

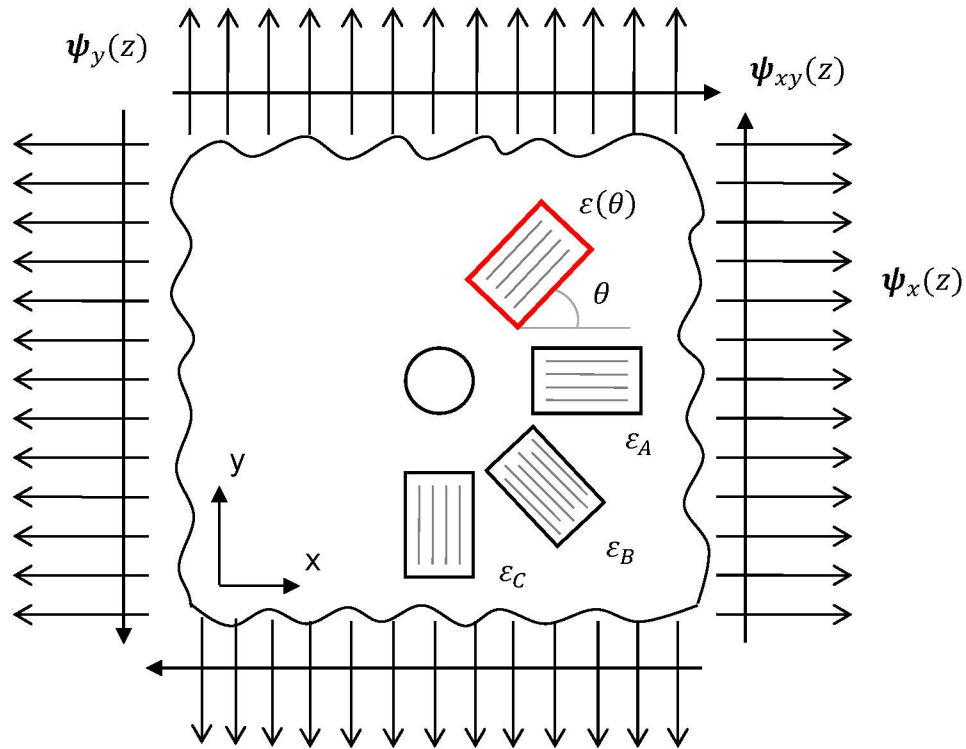
#### 6.4.4 Superposição das deformações devido aos campos de tensões residuais

Considerando que o problema estrutural em questão obedece a TEL, as tensões normais na direção x e na direção y e a tensão cisalhante no plano definido pelos eixos x e y podem ser superpostas, como mostra a FIGURA 35. Com isso, para cada incremento de perfuração  $j$ , fazendo a superposição das deformações  $\varepsilon_x^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_x)$ ,  $\varepsilon_y^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_y)$  e  $\varepsilon_{xy}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_{xy})$ , tem-se que a deformação resultante  $\varepsilon^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_{xy})$ , em função da posição  $\theta$  e dos fatores  $\mathbf{T}_x$ ,  $\mathbf{T}_y$  e  $\mathbf{T}_{xy}$ , podendo ser escrita como

$$\varepsilon^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_{xy}) = \varepsilon_{rx}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_x) + \varepsilon_{ry}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_y) + \varepsilon_{rxy}^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_{xy}). \quad (45)$$

Nesta equação apresentada, os fatores  $\mathbf{T}_x$ ,  $\mathbf{T}_y$  e  $\mathbf{T}_{xy}$  estão vinculados aos carregamentos normal na direção x, normal na direção y e cisalhante no plano xy, respectivamente, os quais são utilizados para traçar as curvas das tensões, conforme ilustra a FIGURA 26.

FIGURA 35 - SUPERPOSIÇÃO DAS TENSÕES NAS DIREÇÕES X E Y E NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X E Y PARA OBTENÇÃO DAS DEFORMAÇÕES RELAXADAS.



FONTE: O autor (2020).

Substituindo as equações para  $\varepsilon_{rx}^{MEF}$ ,  $\varepsilon_{ry}^{MEF}$  e  $\varepsilon_{rxy}^{MEF}$ , obtém-se a equação

$$\begin{aligned}
 \varepsilon^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_x, \mathbf{T}_y, \mathbf{T}_{xy}) = & \\
 & \sum_{i=1}^n T_{xi} \cdot \left[ \left( \frac{\varepsilon_{Ax}^{MEF} + \varepsilon_{Cx}^{MEF}}{2} \right) + \left( \frac{\varepsilon_{Ax}^{MEF} - \varepsilon_{Cx}^{MEF}}{2} \right) \cos(2\theta) \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\varepsilon_{Ax}^{MEF} + \varepsilon_{Cx}^{MEF} - 2 \cdot \varepsilon_{Bx}^{MEF}}{2} \right) \text{sen}(2\theta) \right] + \\
 & \sum_{i=1}^n T_{yi} \cdot \left[ \left( \frac{\varepsilon_{Ay}^{MEF} + \varepsilon_{Cy}^{MEF}}{2} \right) + \left( \frac{\varepsilon_{Ay}^{MEF} - \varepsilon_{Cy}^{MEF}}{2} \right) \cos(2\theta) \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\varepsilon_{Ay}^{MEF} + \varepsilon_{Cy}^{MEF} - 2 \cdot \varepsilon_{By}^{MEF}}{2} \right) \text{sen}(2\theta) \right] + \\
 & \sum_{i=1}^n T_{xyi} \cdot \left[ \left( \frac{\varepsilon_{Axy}^{MEF} + \varepsilon_{Cxy}^{MEF}}{2} \right) + \left( \frac{\varepsilon_{Axy}^{MEF} - \varepsilon_{Cxy}^{MEF}}{2} \right) \cos(2\theta) \right. \\
 & \left. + \left( \frac{\varepsilon_{Axy}^{MEF} + \varepsilon_{Cxy}^{MEF} - 2 \cdot \varepsilon_{Bxy}^{MEF}}{2} \right) \text{sen}(2\theta) \right].
 \end{aligned} \tag{46}$$

Realizando a superposição das deformações e conhecendo os valores das deformações medidas no modelo de elemento finitos, os vetores  $\mathbf{T}_x$ ,  $\mathbf{T}_y$  e  $\mathbf{T}_{xy}$  ficam como variáveis da equação. Assim, aplicando um método de otimização, considerando todos os  $j$ -ésimos incrementos de perfuração, é possível aproximar às deformações reais medidas nos extensômetros físicos.

## 6.5 OBTENÇÃO DO CAMPO DE TENSÕES RESIDUAIS VIA TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO

O processo de otimização híbrida é utilizado para obtenção do campo de tensões residuais por possibilitar uma busca com muitas variáveis simultaneamente em diversas regiões viáveis, pela facilidade de implementação e por atingir uma boa precisão do ótimo global de forma aproximada. Assim, com o propósito de realizar a otimização híbrida, define-se o vetor  $\mathbf{T}_D$  considerado o vetor de variáveis de projeto, composto pelos vetores  $\mathbf{T}_x$  e  $\mathbf{T}_y$  e  $\mathbf{T}_{xy}$ , os quais foram definidos pelas equações 25, 26 e 27, como

$$\mathbf{T}_D = (T_{x_1}, T_{x_2}, \dots, T_{x_n}, T_{y_1}, T_{y_2}, \dots, T_{y_n}, T_{xy_1}, T_{xy_2}, \dots, T_{xy_n}). \quad (47)$$

Com o intuito de obter o perfil de TR, deve-se variar as componentes deste vetor de variáveis de projeto  $T_{D_i}$  na função  $\varepsilon^{MEF}(\theta, \mathbf{T}_D)$ , de forma que  $\varepsilon^{MEF}(\theta = 0^\circ, \mathbf{T}_D)$  se aproxime da deformação medida  $\varepsilon_A^{EXP}$ ,  $\varepsilon^{MEF}(\theta = 315^\circ, \mathbf{T}_D)$  se aproxime de  $\varepsilon_B^{EXP}$  e  $\varepsilon^{MEF}(\theta = 270^\circ, \mathbf{T}_D)$  se aproxime de  $\varepsilon_C^{EXP}$ . Para isso, é definida uma função erro quadrático com os três termos (três extensômetros) para encontrar os valores de cada componente de  $\mathbf{T}_D$  tal que o erro seja mínimo, dado por

$$e(\mathbf{T}_D)_j = ([\varepsilon^{MEF}(\theta = 0^\circ, \mathbf{T}_D) - \varepsilon_A^{EXP}]^2 + [\varepsilon^{MEF}(\theta = 315^\circ, \mathbf{T}_D) - \varepsilon_B^{EXP}]^2 + [\varepsilon^{MEF}(\theta = 270^\circ, \mathbf{T}_D) - \varepsilon_C^{EXP}]^2)_j, \quad (48)$$

onde  $e(\mathbf{T}_D)_j$  é o erro quadrático calculado para cada profundidade de furo  $j$ .

Com o intuito de calcular o erro quadrático total, a fim de considerar todos os incrementos de perfurações ao longo da profundidade na direção  $z$ , faz-se o somatório

dos erros  $e(\mathbf{T}_D)_j$ . Com isso, tem-se a função objetivo do problema de otimização, a ser minimizada, dada por

$$E(\mathbf{T}_D) = \sum_{j=1}^{nf} e(\mathbf{T}_D)_j. \quad (49)$$

Dessa forma, o problema padrão de otimização consiste em minimizar a função  $E(\mathbf{T}_D)$ , em que as variáveis de projeto podem ser explicitadas pelo vetor  $\mathbf{T}_D$ , cujas componentes estão sujeitas às restrições de desigualdade

$$Tx_{inf} \leq Tx_i \leq Tx_{sup}, \quad (i = 1 \dots n) \quad (50)$$

$$Ty_{inf} \leq Ty_i \leq Ty_{sup}, \quad (i = 1 \dots n) \quad (51)$$

$$Txy_{inf} \leq Txy_i \leq Txy_{sup}, \quad (i = 1 \dots n) \quad (52)$$

onde  $3.n$  é o número de elementos que compõe o vetor variável de projeto  $\mathbf{T}_D$ . Baseando-se no Teorema de Weierstrass (ARORA, 2017), esse problema possui como únicas restrições, os valores limites mínimo e máximo para cada elemento  $T_{D_i}$  do vetor  $\mathbf{T}_D$ . Estes limites são inseridos somente para assegurar que o problema de otimização seja bem-posto, garantindo a existência de uma solução.

Com o propósito de solucionar o problema padrão de otimização, a função objetivo  $E(\mathbf{T}_D)$  deve ser minimizada. Este trabalho emprega um método de otimização híbrida, que combina a busca por AG e a PNL. Com isso, as componentes do vetor  $\mathbf{T}_D$  podem ser encontradas, de modo a possibilitar a reconstrução do perfil de TR ao longo da profundidade.

Na primeira etapa, aplicando a otimização por AG no ambiente *matlab*, a função objetivo é minimizada até atingir um critério de parada com o uso da função *TolFun* ou devido ao número de gerações estabelecido. Na segunda etapa, após encontrar um ponto ótimo próximo ao mínimo global por AG, a busca é refinada aplicando a otimização por PNL, chegando ao mínimo global com boa precisão. Na PNL também são adotados critérios de parada com o uso da função *TolFun* e limitando o número máximo de interações.

## 7 MATERIAIS E MÉTODOS

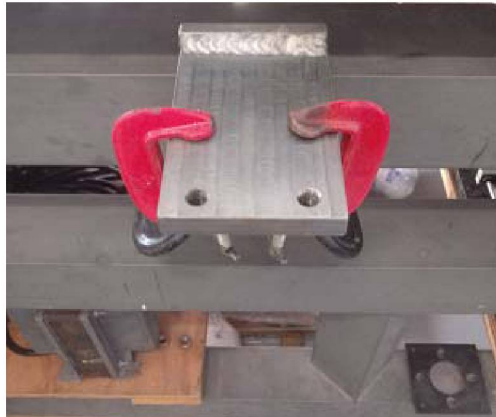
Este Capítulo é composto por duas seções. Na primeira seção, são descritos os materiais utilizados e, na segunda seção, os métodos empregados para a realização dos experimentos físicos.

### 7.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados recursos próprios, recursos públicos do Laboratório de Mecânica dos Sólidos Computacional da Universidade Federal do Paraná (LaSCom/UFPR) e do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), conforme a seguinte relação:

- i. Microcomputador do LaSCom/UFPR, com licenças dos *softwares* Microsoft Office (Microsoft Excel, Power Point e Word), *Matlab*® e *Abaqus*®;
- ii. Suporte para fixação dos corpos de prova (FIGURA 36);

FIGURA 36 - SUPORTE PARA FIXAR OS CORPOS.



FONTE: O AUTOR (2020).

- iii. Duas barras retangulares 75 x 300 x 12 mm de alumínio AA 6063-T5 laminada e duas barras retangulares de dimensões 75 x 300 x 5,3 mm de aço AISI 1025 laminada. Essas barras foram utilizadas nos ensaios (FIGURA 37), sendo que suas propriedades mecânicas constam nas TABELAS 7 e 8, respectivamente;

FIGURA 37 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NOS ENSAIOS.



FORNE: O AUTOR (2020).

TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ALUMÍNIO AA-6063

Módulo de elasticidade	Coefficiente de Poisson	Massa Específica	Limite de Escoamento
69 GPa	0,33	$2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	150 MPa

FORNE: LAI; RUBIN; KREML (2010); SADD (2014).

TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO AISI 1025

Módulo de elasticidade	Coefficiente de Poisson	Massa Específica	Limite de Escoamento
207 GPa	0,3	$7,86 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$	350 MPa

FORNE: LAI; RUBIN; KREML (2010); SADD (2014).

- iv. Um forno mufla modelo LF0910 da marca Jung, com potência elétrica de 3 kW e capacidade de 1000 °C, utilizado para aliviar as tensões originadas dos processos de fabricação (FIGURA 38), com a realização de um tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões. Neste processo, os corpos de prova são aquecidos durante duas horas e, subsequentemente, são resfriados de forma gradativa dentro do forno. No caso do alumínio, a temperatura de aquecimento foi de 250 °C (PANAGOPOULOS; GEORGIU, 2009) e, no caso do aço, a temperatura de aquecimento foi de 600 °C (BAJAJ; HARIHARAN; KÜRNSTEINER, 2020; KAHROBAEE; HEJAZI, 2017). Esses valores foram estimados com base no diagrama de fases de cada material. Logo, ambas as temperaturas de aquecimento estão abaixo do limite inferior da zona crítica.

FIGURA 38 - FORNO RESISTIVO.



FONTE: O AUTOR (2020).

- v. Uma balança de pesagem com precisão de 0,005 kg da marca Welmy, para pesar um bloco empregado na aplicação dos carregamentos de flexão nas barras retangulares (FIGURA 39);

FIGURA 39 - BALANÇA DE PESAGEM DIGITAL.



FONTE: O AUTOR (2020).

- vi. Um paquímetro digital de 200 mm com precisão de 0,01 mm da marca Tesa (FIGURA 40);

FIGURA 40 - PAQUÍMETRO DIGITAL.



FONTE: O AUTOR (2020).

- vii. Um goniômetro de 300 mm com graduação de 5 minutos da marca Mitotoyo (FIGURA 41);

FIGURA 41 - GONIÔMETRO.



FONTE: O AUTOR (2020).

- viii. Álcool isopropílico utilizado para limpeza da região de fixação das rosetas (FIGURA 42);

FIGURA 42 - ÁLCOOL ISOPROPÍLICO.



FONTE: O AUTOR (2020).

- ix. Adesivo instantâneo de viscosidade média da marca *Tekbond*, utilizado para colar as rosetas na superfície dos corpos de prova (FIGURA 43);

FIGURA 43 - ADESIVO INSTANTÂNEO.



FONTE: O AUTOR (2020).

- x. Rosetas do tipo B modelo PA 06 060RF 120 L da marca Excelsensor, utilizadas para medir as deformações relaxadas (FIGURA 44). Os filamentos dos extensômetros são conectados aos terminais de solda;

FIGURA 44 - ROSETA DO TIPO B.



FONTE: O AUTOR (2020).

- xi. Suporte para apoiar a furadeira pneumática com um anel micrométrico que controla o avanço de profundidade (FIGURA 45);

FIGURA 45 - SUPORTE PARA FIXAR A FURADEIRA.



FONTE: O AUTOR (2020).

- xii. Lupa da marca *Micro Measurements* (FIGURA 46) utilizada para focar e posicionar a broca no centro da roseta (FIGURA 47) onde são executadas as perfurações;

FIGURA 46 - LUPA PARA CENTRAGEM.



FONTE: O AUTOR (2020).

FIGURA 47 - CENTRAGEM DO POSICIONAMENTO DO FURO.



FONTE: O AUTOR (2020).

- xiii. Uma furadeira pneumática que funciona com uma rotação de 100.000 rpm (constante) da marca *Micro Measurements* (FIGURA 48) utilizada para a execução das perfurações;

FIGURA 48 - FURADEIRA PNEUMÁTICA.



FONTE: O AUTOR (2020).

- xiv. Broca Jet Carbide Cônica Invertida com a ponta de Carboneto de Tungstênio da marca labor dental (FIGURA 49);

FIGURA 49 - BROCA.



FONTE: O AUTOR (2020).

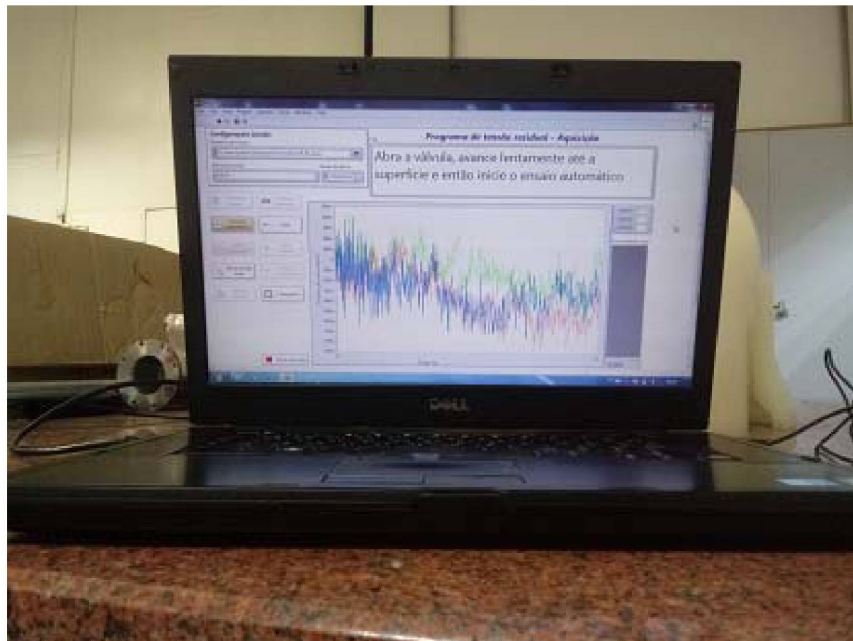
- xv. Sistema de aquisição de dados da marca *National Instruments* (FIGURA 50), utilizado para transferir os dados das deformações relaxadas, durante o processo de furação, ao *software* instalado no computador. Essa transferência ocorre através de uma entrada na qual são conectados os cabos elétricos ligados aos terminais de solda (*Bondable Terminals*) e uma saída onde é conectado um cabo com conexão USB;

FIGURA 50 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.



FONTE: O AUTOR (2020).

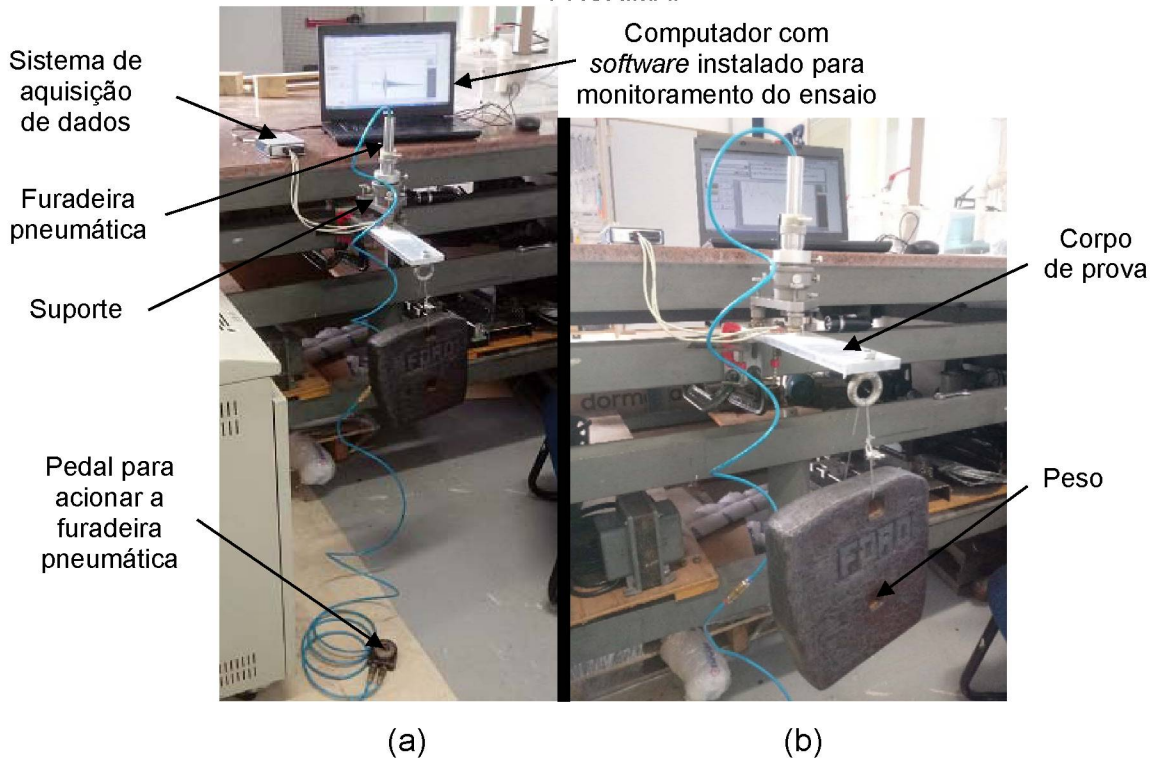
- xvi. Programa *Labview* para tratamento dos dados das deformações relaxadas durante o processo de perfuração incremental (FIGURA 51);

FIGURA 51 - PÁGINA FRONTAL DO PROGRAMA *LABVIEW*.

FONTE: O AUTOR (2020).

- xvii. Conjunto de equipamentos para a realização do experimento no LACTEC (FIGURA 52).

FIGURA 52 - EXPERIMENTAÇÃO. (A) CONJUNTO DE EQUIPAMENTOS. (B) VISUALIZAÇÃO MAIS PRÓXIMA.



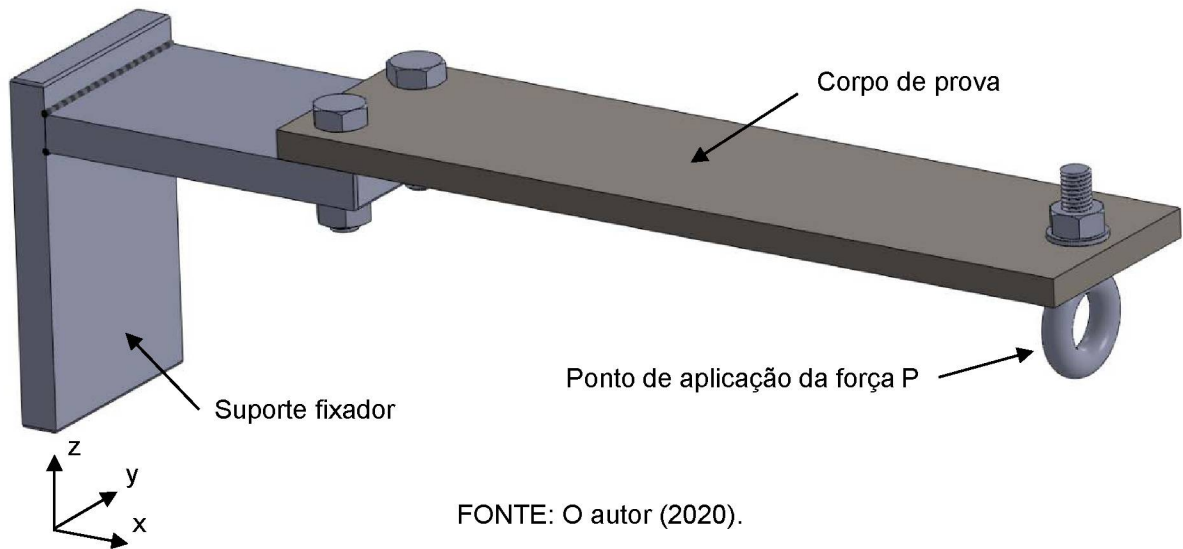
FONTE: O AUTOR (2020).

## 7.2 MÉTODOS

Com o propósito de gerar um perfil de tensões internas conhecido através da flexão de uma viga engastada, foi construído um dispositivo mecânico (FIGURA 53). Esse dispositivo é composto por um suporte e elementos de fixação, que mantêm o corpo de prova na posição adequada, e um olhal no qual é aplicada uma força  $P$  através de um peso suspenso por um cabo de aço, que provoca uma flexão no corpo de prova. Essa força  $P$  é aplicada a uma distância  $L$  do local onde são instaladas as rosetas (FIGURA 54). À medida em que são executadas as perfurações incrementais com uma profundidade de 0,05 mm, são medidos os valores das deformações relaxadas na superfície dos corpos, conforme o método de teste padrão estabelecido pela norma ASTM E 837-13 (2013).

Para a realização dos experimentos físicos, foram selecionados quatro corpos de prova, sendo dois de AA 6063-T5 e dois de AISI 1025, conforme mencionado na seção anterior. Três rosetas do tipo B (FIGURA 55), são instaladas em cada uma das duas linhas: a uma distância  $L=225$  mm e a uma distância  $L=250$  mm em relação ao ponto de aplicação da força  $P=183$  N (FIGURA 54).

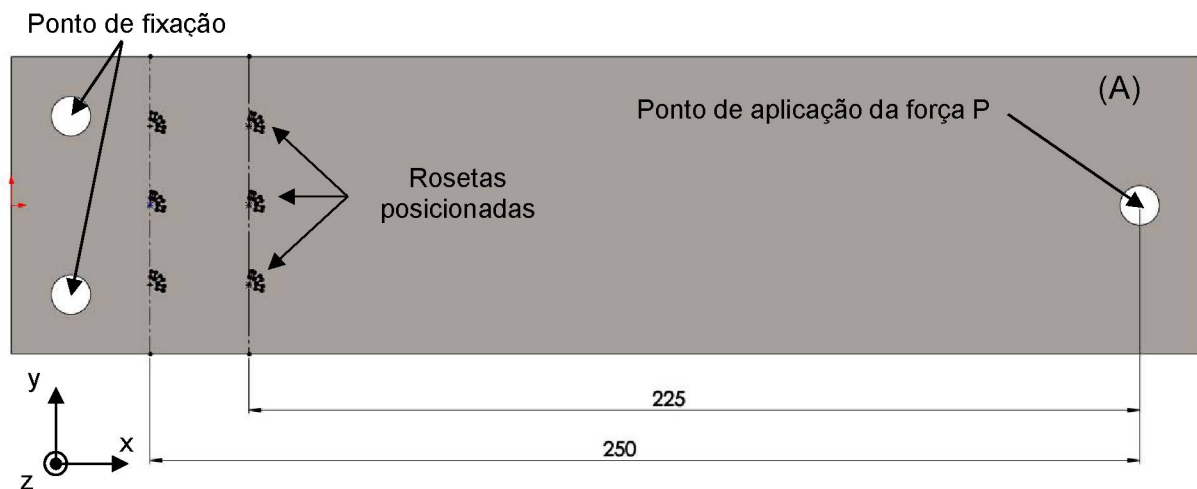
FIGURA 53 - PROTÓTIPO PARA SIMULAR FÍSICAMENTE A FLEXÃO DE UMA VIGA.



FONTE: O autor (2020).

Em cada linha, as rosetas são espaçadas em 20 mm, garantido que não haja influência do campo de tensões gerado devido às perfurações. Em decorrência do momento fletor gerado, essa força aplicada induz um perfil linear de tensões normais na direção longitudinal da barra ao longo da sua espessura, no qual o valor máximo de tensão está consideravelmente abaixo do limite de escoamento de cada material. O limite de escoamento do alumínio AA 6063-T5 consta na TABELA 7 e do aço AISI 1025 consta na TABELA 8 (BORESI; SCHMIDT, 2003; SHIGLEY; MISCHKE; BUDYNAS, 2005).

FIGURA 54 - DISTÂNCIAS DAS LINHAS ONDE AS ROSETAS SÃO ANEXADAS.



FONTE: O autor (2020).

Quando uma força  $P$  é aplicada a uma distância  $L$  na viga com um perfil retangular  $b \times h$ , um campo de tensão é gerado, variando de um valor máximo de tensão (tração) na superfície superior a um valor mínimo de tensão (compressão) na superfície inferior, conforme apresentado na TABELA 9, com a aplicação da equação

$$\sigma = \frac{\pm 6.P.L}{b.h^2}. \quad (53)$$

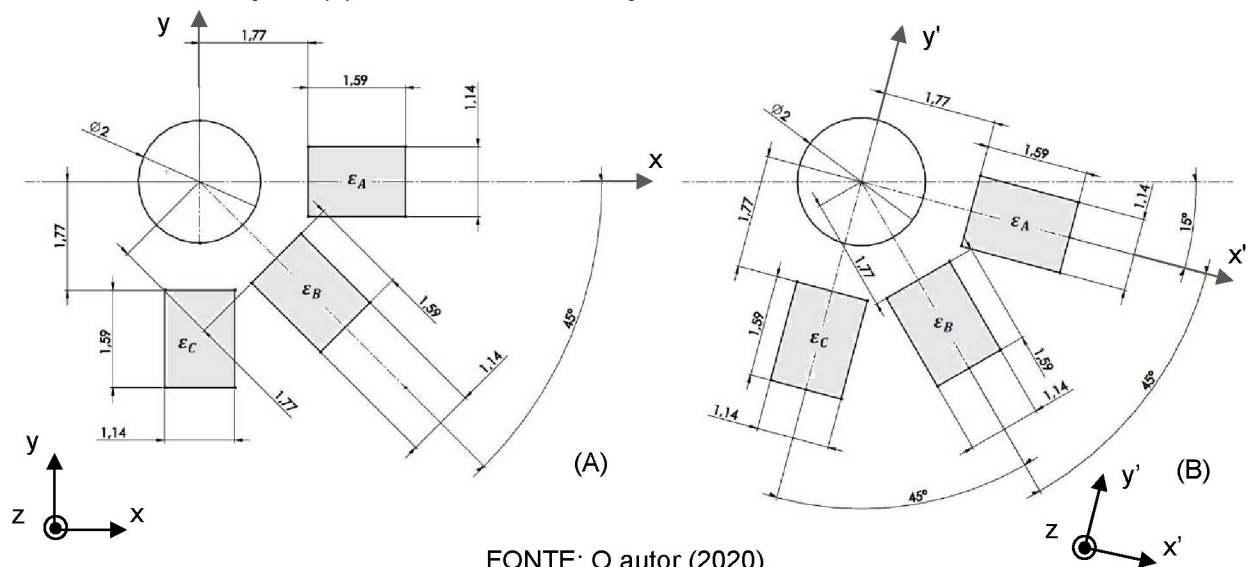
TABELA 9 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS DAS TENSÕES NORMAIS CONFORME AS ESPESSURAS E AS DISTÂNCIAS DAS LINHAS DE MEDIÇÃO

Espessura (h)	Distância (L)	Tensão mínima	Tensão Máxima
5,3 mm	225,0 mm	- 117 MPa	117 MPa
5,3 mm	250,0 mm	- 130 MPa	130 MPa
12,0 mm	225,0 mm	- 22,8 MPa	22,8 MPa
12,0 mm	250,0 mm	- 25,4 MPa	25,4 MPa

FONTE: O autor (2020).

Com a finalidade de validar a forma de obter os ângulos das tensões principais, através da metodologia proposta, uma configuração com uma rotação de  $15^\circ$  no sentido horário é utilizada neste trabalho, conforme mostra a FIGURA 55.b. Nesta configuração, o extensômetro  $\varepsilon_A$  da roseta do tipo B forma um ângulo de  $15^\circ$  em relação ao eixo  $x$ .

FIGURA 55 - CONFIGURAÇÕES DE INSTALAÇÃO DAS ROSETAS DO TIPO B. (A) ROSETA SEM ROTAÇÃO. (B) ROSETA COM ROTAÇÃO DE  $15^\circ$  NO SENTIDO HORÁRIO.



FONTE: O autor (2020).

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dividido em duas partes: Análises estatísticas e análise da metodologia empregada para a obtenção do perfil de TR. Com as análises estatísticas processadas, os melhores dados experimentais são selecionados e, a partir deles, aplica-se a metodologia proposta neste trabalho. Com isso, os resultados do perfil de TR são alcançados e apresentados.

### 8.1 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para a realização das análises estatísticas, as respostas provenientes dos experimentos físicos são coletadas, analisadas e interpretadas. Com o intuito de validar os dados experimentais, são aplicados métodos estatísticos, que avaliam como as respostas extraídas de experimentos variam, e permitem mensurar a sua variabilidade. Nas análises estatísticas são comparadas as médias dos tratamentos, são testadas a homogeneidade das variâncias, a normalidade dos resíduos, a independências dos resíduos e, por último, avaliado o desvio padrão relativo.

#### 8.1.1 Análise da Variância

As variáveis respostas, denominadas deformações relaxadas, provenientes dos experimentos físicos, estão explicitadas nas TABELAS 23 a 42 do APÊNDICE I. Essas variáveis respostas obtidas estão discriminadas de acordo com o tipo de material e, para cada material, são induzidos dois níveis de tensão, totalizando quatro casos (tratamentos), conforme consta na TABELA 10. Esses 4 conjuntos de experimentos são discutidos e analisados na sequência deste capítulo.

TABELA 10 - CASOS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS FÍSICOS

Casos	Tipo de material	Distância da força aplicada em relação à posição da roseta	Número de repetições
Caso 1	Alumínio AA-6063	225 mm	5
Caso 2	Alumínio AA-6063	250 mm	5
Caso 3	Aço AISI 1025	225 mm	5
Caso 4	Aço AISI 1025	250 mm	5

FONTE: O autor (2020).

As deformações relaxadas, medidas durante a realização dos experimentos físicos, foram processadas e analisadas com o uso do *software* R 3.6.3, para cada incremento de perfuração, com a realização da ANOVA, a qual compara as médias entre os quatro tratamentos. Conforme consta na TABELA 43 do APÊNDICE J, os resultados da ANOVA ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) mostram que houve diferenças entre as médias dos tratamentos, considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Como são analisados dois materiais com diferentes módulos de elasticidade, espessuras e níveis de tensões induzidas, as médias dos valores extraídos experimentalmente apresentaram diferenças.

Para realizar as comparações múltiplas entre os tratamentos, com o intuito de identificar a diferença entre as médias, o teste de Tukey foi aplicado e os resultados são apresentados na TABELA 44 do APÊNDICE L. Nessa tabela, pode-se observar que, para o mesmo tipo de material, houve médias estatisticamente iguais ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Apesar de serem induzidos diferentes níveis de tensão, como as espessuras dos corpos com o mesmo tipo de material são iguais, bem como as suas propriedades mecânicas, as deformações relaxadas, para cada perfuração incremental, ficaram próximas. Assim, não houve diferença significativa nos tratamentos que utilizam o mesmo tipo de material.

Os resultados provenientes da ANOVA são utilizados para a realização da análise dos resíduos dos dados experimentais. Vale ressaltar que a interação entre os fatores não foi significativa, conforme apresentada na TABELA 45 do APÊNDICE M.

#### 8.1.2 Teste de homogeneidade das variâncias dos resíduos

A suposição de homogeneidade das variâncias dos resíduos pode ser analisada aplicando o teste de Bartlett. Quando há homogeneidade da variância, a variabilidade entre os experimentos de um mesmo tratamento é semelhante aos demais tratamentos. Para verificar essa ocorrência, são formuladas as seguintes hipóteses: as variâncias entre os tratamentos são homogêneas; e as variâncias entre os tratamentos são heterogêneas. Os dados experimentais com variâncias homogêneas propiciam melhores resultados pelo fato de apresentar menor variabilidade entre as repetições, tornando os resultados mais confiáveis. Quando as

variâncias são constantes, existe uma variabilidade muito próxima nos diferentes tratamentos. Assim, os dados que apresentam homogeneidade das variâncias dos resíduos, conforme os critérios pré-estabelecidos, têm uma qualidade experimental aceitável.

Aplicando o teste de Bartlett e considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), pode-se analisar se as variâncias referentes aos experimentos realizados apresentam homogeneidade ou heterogeneidade. A TABELA 46, apresentada no APÊNDICE N, mostra os resultados do teste de homogeneidade das variâncias. Analisando esses resultados, observa-se que as deformações relaxadas na profundidade de perfuração 0,80 mm para o extensômetro  $\varepsilon_C$  e as deformações relaxadas nas profundidades de 0,85 mm e 0,90 mm para o extensômetro  $\varepsilon_B$  confirmam a hipótese de que as variâncias entre os tratamentos são heterogêneas (p-valor  $< 0,05$ ). As demais deformações relaxadas se enquadram na hipótese de que as variâncias entre os tratamentos são homogêneas (p-valor  $> 0,05$ ).

As possíveis causas que levaram os resíduos dos dados experimentais não apresentarem homogeneidade das variâncias, nas profundidades e nos extensômetros mencionados, foram: deslocamento transversal da broca, causando um contato da broca com a superfície interna do furo durante as últimas perfurações; avanço de cada incremento de perfuração através do tambor graduado micrométrico; sensibilidade dos extensômetros que compõem as rosetas aderidas sobre a superfície do corpo; ruídos devido à vibrações durante o processo de perfuração.

### 8.1.3 Teste de normalidade dos resíduos

A normalidade dos resíduos pode ser analisada aplicando o teste de Shapiro-Wilk aos dados experimentais. Com base nesse teste, verifica-se se os resíduos se comportam dentro de uma distribuição normal com base na formulação de duas hipóteses: os resíduos apresentam normalidade; e os resíduos não apresentam normalidade. O teste de normalidade dos resíduos é importante para avaliar a qualidade dos dados experimentais, sendo que a sua existência significa que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente de forma padrão, segundo uma curva de distribuição Gaussiana. Entretanto, a falta de normalidade dos resíduos significa que algum resíduo destoa do padrão na distribuição de probabilidade, podendo afetar a

validade dos intervalos de confiança e dos testes de hipótese, impactando em valores não confiáveis.

A TABELA 47, apresentada no APÊNDICE O, mostra os resultados do teste de normalidade dos resíduos. Nota-se que em alguns dos últimos incrementos não houve uma normalidade dos resíduos, considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Os valores de deformações relaxadas no incremento de perfuração nos níveis de profundidade 0,95 mm e 1,00 mm para o extensômetro  $\varepsilon_A$ , as deformações relaxadas no incremento de perfuração nos níveis de profundidade 0,55 mm, 0,90 mm e 0,95 mm para o extensômetro  $\varepsilon_B$  e as deformações relaxadas no incremento de perfuração nos níveis de profundidade 0,70 mm e 0,85 mm para o extensômetro  $\varepsilon_C$  têm resíduos que não apresentam uma normalidade (p-valor  $< 0,05$ ). As deformações relaxadas no incremento de perfuração no nível de profundidade 0,55 mm do extensômetro  $\varepsilon_B$  e no incremento de perfuração no nível de profundidade 0,70 mm do extensômetro  $\varepsilon_C$  são os mais próximos do início do processo (mais próximos da superfície). Por isso, fez-se uma análise da normalidade dos resíduos para cada um destes tratamentos separadamente, com o objetivo de verificar quais entre eles apresentam normalidade ou não (TABELA 11).

Na TABELA 11 são apresentados os resultados do teste de Shapiro-Wilk para os tratamentos de forma separada, os quais mostram as análises de cada um dos quatro casos. Assim, considerando um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), apenas o caso 1 (tratamento) não apresenta normalidade (p-valor  $< 0,05$ ) dos resíduos para os dois incrementos e extensômetros mencionados.

TABELA 11 - ANÁLISE ISOLADA PARA CADA CASO DA NORMALIDADE DOS RESÍDUOS

Perfuração no nível 0,55 mm do extensômetro $\varepsilon_B$		Perfuração no nível 0,70 mm do extensômetro $\varepsilon_C$	
Casos (tratamentos)	p-valor	Casos (tratamentos)	p-valor
Caso 1	0,0462	Caso 1	0,0164
Caso 2	0,0664	Caso 2	0,4950
Caso 3	0,6444	Caso 3	0,0562
Caso 4	0,2354	Caso 4	0,6968

FONTE: O autor (2020).

As causas mais prováveis, as quais levaram os resíduos dos dados experimentais não apresentarem normalidade, são aquelas mencionadas na análise da homogeneidade das variâncias.

#### 8.1.4 Teste para verificar a independência

Independência dos resíduos significa que os resíduos são aleatórios, ou seja, não estão correlacionados por nenhum fator específico. Por outro lado, caso não exista aleatoriedade entre os resíduos, havendo uma tendência por algum fator específico, os resíduos podem apresentar dependência. A independência dos resíduos é usualmente avaliada através de um gráfico dos valores ajustados em função dos resíduos. Conhecendo esses aspectos, formulam-se as seguintes hipóteses: há independência dos dados residuais e não há independência dos dados residuais. Na hipótese de satisfazer a suposição de independência, não deve existir nenhum padrão neste gráfico, ou seja, nenhum comportamento não aleatório dos valores observados, os quais devem estar dispersos em torno de zero (média dos resíduos).

A FIGURA 88, apresentada no APÊNDICE P, mostra os resultados do teste de independência dos resíduos (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Como o comportamento dos resíduos são aleatórios e não apresentam nenhuma tendência linear por existir uma fraca correlação linear (coeficiente de correlação linear baixo) entre os resíduos, percebe-se que há independências dos resíduos para todos os níveis de perfurações para os três extensômetros. Por conseguinte, a hipótese de que os resíduos são independentes é aceita.

#### 8.1.5 Teste do desvio padrão relativo

Outra forma de analisar os resultados é mediante o desvio padrão relativo (DPR), conhecido como coeficiente de variação (CV) (OWEN, 2010). Com base nos dados experimentais, foram encontrados as médias e os desvios padrão para cada tratamento, conforme mostradas nas TABELAS 48 a 55 do APÊNDICE Q. A TABELA 12 mostra os DPR's de cada incremento de perfuração para o caso 1, a TABELA 13, para o caso 2, a TABELA 14, para o caso 3 e, a TABELA 15, para o caso 4.

A FIGURA 56 mostra DPR'S médios dos quatro tratamentos para cada extensômetro em função da profundidade, evidenciando que nos últimos incrementos os valores são substanciais.

TABELA 12 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 1: CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
EA	5,0%	3,3%	4,8%	6,4%	6,3%	3,4%	4,1%	3,4%	2,9%	4,2%
EB	14,1%	13,3%	14,0%	13,4%	14,3%	11,5%	13,3%	13,8%	14,6%	14,7%
EC	4,3%	4,3%	3,0%	5,4%	5,8%	5,9%	5,4%	7,0%	4,1%	4,7%
Profundidade	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
EA	3,5%	4,3%	3,4%	4,1%	4,9%	5,3%	7,9%	13,4%	12,6%	16,5%
EB	13,1%	14,5%	15,4%	14,8%	13,0%	17,1%	19,4%	21,4%	18,1%	26,5%
EC	5,0%	4,8%	5,8%	5,8%	5,2%	9,4%	20,4%	19,5%	28,5%	35,3%

FONTE: O autor (2020).

TABELA 13 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 2: CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
EA	5,5%	5,6%	5,6%	4,8%	5,5%	5,2%	6,7%	5,7%	3,6%	5,9%
EB	7,4%	7,8%	8,4%	7,0%	7,3%	7,1%	7,1%	6,7%	8,2%	9,4%
EC	5,1%	6,2%	6,8%	5,3%	7,0%	4,5%	5,8%	6,0%	6,2%	3,3%
Profundidade	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
EA	6,4%	4,8%	4,6%	5,6%	6,6%	8,5%	7,1%	4,0%	12,4%	14,3%
EB	8,3%	7,7%	6,5%	6,8%	7,9%	10,6%	16,7%	43,8%	24,3%	20,5%
EC	4,8%	6,5%	5,7%	4,4%	8,0%	10,7%	39,9%	34,2%	49,5%	30,6%

FONTE: O autor (2020).

TABELA 14 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 3: CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
EA	3,6%	2,6%	2,4%	3,4%	3,3%	2,8%	2,1%	3,5%	3,4%	3,6%
EB	4,5%	6,7%	6,2%	4,7%	5,1%	3,7%	4,8%	6,3%	5,3%	5,7%
EC	3,2%	2,5%	2,6%	2,5%	4,0%	3,1%	2,6%	3,1%	4,6%	4,7%
Profundidade	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
EA	4,0%	2,5%	3,2%	4,1%	4,5%	6,1%	6,8%	7,0%	11,2%	12,5%
EB	5,9%	6,8%	5,4%	5,8%	7,0%	7,2%	14,6%	29,7%	45,5%	31,1%
EC	3,5%	3,1%	2,9%	2,9%	3,6%	5,4%	4,6%	7,6%	10,7%	14,6%

FONTE: O autor (2020).

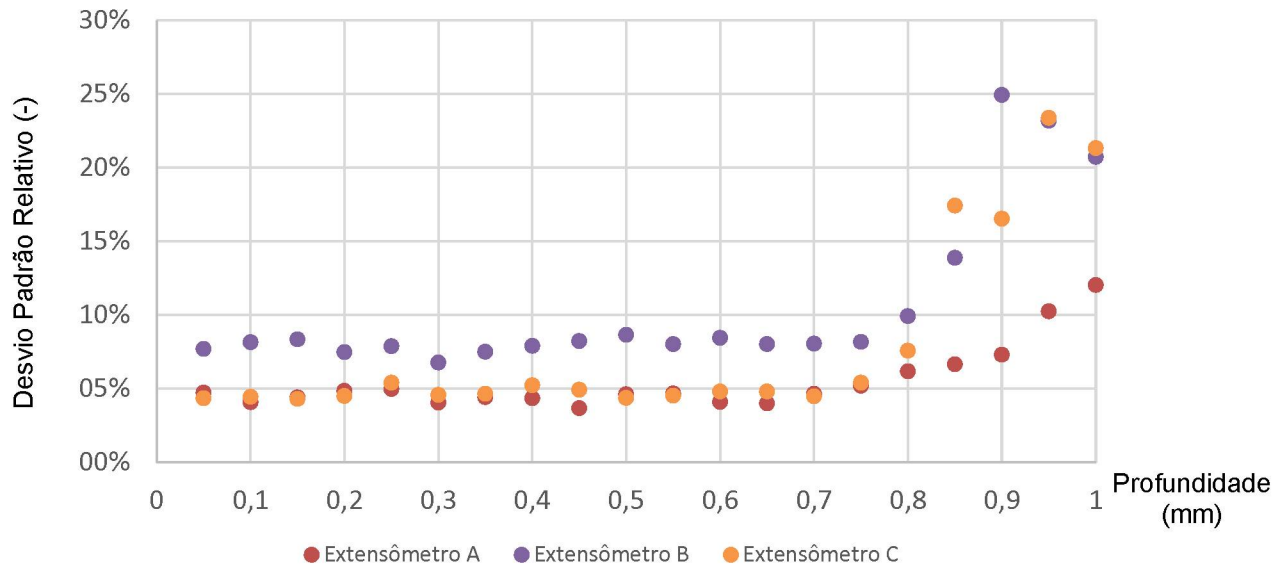
TABELA 15 - DPR'S DAS MEDIÇÕES DO CASO 4: CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
EA	4,8%	4,1%	4,7%	3,6%	3,9%	5,2%	5,2%	4,4%	3,0%	4,9%
EB	6,1%	5,8%	5,1%	5,9%	6,4%	6,9%	5,9%	7,7%	7,4%	5,7%
EC	3,9%	4,4%	4,0%	4,8%	4,8%	5,3%	4,0%	4,4%	2,7%	6,1%
Profundidade	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
EA	4,5%	4,1%	3,1%	3,9%	7,0%	5,4%	5,3%	5,6%	6,8%	7,8%
EB	5,1%	4,8%	6,4%	7,8%	6,7%	5,4%	5,1%	4,4%	32,9%	33,8%
EC	4,6%	3,3%	4,1%	3,5%	5,4%	6,9%	12,1%	13,8%	15,7%	17,4%

FONTE: O autor (2020).

Constatou-se que as medições relativas aos furos de maior profundidade apresentaram um valor de DPR acentuado. Com isso, as últimas medições, nas quais os DPR's são superiores a 10%, são rejeitadas devido à variabilidade dos dados experimentais apresentados (DOUGHTY, 2020; ELEFTHERIOU, 2019). Como, no caso 1 (TABELA 12) e no caso 2 (TABELA 13), as perfurações a partir da profundidade de 0,8 mm ultrapassaram o valor limite do DPR estipulado, foram utilizados apenas os incrementos até a profundidade de 0,75 mm em todos os casos para encontrar, de forma aproximada, o perfil de tensões residuais a partir da superfície até uma profundidade de 1,5 mm. Apesar de no caso 1 (Tabela 12), os valores do DPR's no extensômetro B estarem todos acima de 10%, também foram mostrados nos resultados obtidos com a metodologia proposta para efeito de comparação.

FIGURA 56 – DPR'S MÉDIOS DOS QUATRO TRATAMENTOS PARA CADA EXTENSÔMETRO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE



FONTE: O autor (2020).

Assim como foi observado na análise dos resíduos, as medições relativas aos furos de maior profundidade apresentaram valores de DPR mais acentuado. A variabilidade mais expressiva, nas últimas perfurações, pode ser justificada em virtude do contato da broca com a superfície interna do furo, durante o final do processo de perfuração, além do desgaste do seu gume cortante. Sabendo que as deformações medidas dependem principalmente das tensões próximas à superfície, a sensibilidade dos extensômetros dimiu consideravelmente com o aumento da profundidade, diminuindo a precisão na leitura das últimas deformações relaxadas.

## 8.2 ANÁLISE DA METODOLOGIA EMPREGADA PARA A CONSTRUÇÃO DO PERFIL DE TR

Uma estrutura computacional foi implementada no ambiente *Matlab*®, tendo como base a metodologia desenvolvida neste trabalho, utilizando um modelo de elementos finitos e uma técnica de otimização híbrida. Esse conjunto de rotinas permite a obtenção dos fatores “T” (os quais, no processo de otimização, são as variáveis de projeto), necessários para construir as curvas que representam o comportamento do perfil de TR contínuo ao longo da profundidade de um componente.

### 8.2.1 Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 1

No caso 1 analisado (corpo de alumínio com uma força aplicada a uma distância de 225 mm da região de medição), considerando um sistema de coordenadas Cartesiano formado pelos eixos  $x'$  e  $y'$  (FIGURA 55.b), foram encontrados 30 fatores para cada um dos 5 experimentos. Dentre esses fatores, 10 são para as tensões normais na direção  $x'$ , 10 são para as tensões normais na direção  $y'$  e 10 são para as tensões cisalhantes no plano  $xy'$ , conforme mostra a TABELA 16. Nesta tabela, LCi corresponde ao i-ésimo carregamento aplicado no bloco do modelo em elementos finitos.

TABELA 16 - FATORES OBTIDOS PELO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

	Carregamentos na direção $x'$					Carregamentos na direção $y'$					Carregamentos no plano $xy'$				
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
LC01	-182,1	-166,7	44,4	-215,9	-42,9	-612,0	-484,0	-210,2	-812,7	-571,9	-100,9	12,6	191,1	-216,9	-308,8
LC02	346,4	68,4	-88,8	-133,1	-312,3	-470,3	-321,1	-259,5	-579,4	-505,8	-106,3	-165,5	-62,5	-35,0	-47,9
LC03	376,1	59,3	161,5	-24,1	-54,1	-39,2	7,3	173,4	66,4	-115,1	317,9	306,5	-122,2	-44,7	94,7
LC04	181,8	15,5	-150,6	389,5	264,6	459,5	291,3	-196,4	533,3	487,9	-124,3	-177,6	25,3	232,5	301,5
LC05	-35,8	178,0	74,3	87,3	131,5	548,4	611,2	298,8	661,2	580,2	227,7	74,3	64,5	366,5	196,9
LC06	213,6	-9,5	-58,6	-1,4	187,9	752,8	266,6	212,6	786,5	732,1	28,3	1,0	-162,6	45,1	84,4
LC07	131,4	142,7	160,6	193,9	235,6	408,3	381,8	419,4	780,9	526,2	-208,4	38,3	-8,1	-116,8	78,9
LC08	187,2	-54,0	81,3	379,8	246,7	109,9	183,4	243,8	16,2	135,3	21,2	-29,9	15,5	-8,0	-159,6
LC09	-128,2	-1,0	-62,7	-126,5	-144,8	-425,3	-366,3	-142,9	-428,0	-541,2	-30,8	33,3	101,7	-146,7	-175,4
LC10	306,6	-92,2	-68,5	-376,7	-351,1	-756,1	-556,0	-546,5	-1004	-720,5	1,8	-20,6	3,7	1,2	2,9

FONTE: O autor (2020).

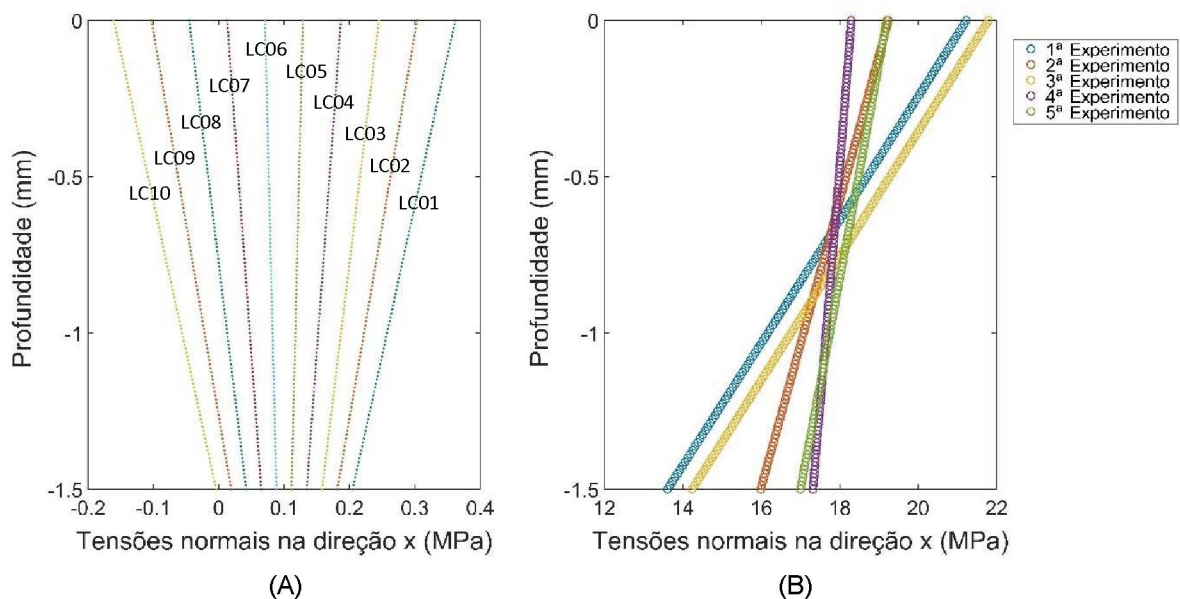
Embora os resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 1 (tabela 12) não terem sido válidos estatisticamente, uma vez em que os valores do DPR passaram dos 10% considerado, esse caso foi mantido como contraexemplo, mostrando a dispersão dos valores encontrados.

Multiplicando as curvas das tensões encontradas via MEF (FIGURA 57.a), devido aos carregamentos aplicados na direção  $x'$ , pelos fatores obtidos no processo de otimização híbrida para a direção  $x'$ , obtiveram-se os perfis das tensões normais na direção  $x'$  (FIGURA 57.b) para os 5 experimentos realizados.

No caso em que são analisadas as tensões normais na direção  $y'$ , multiplicaram-se as curvas das tensões encontradas via MEF (FIGURA 58.a), devido aos carregamentos aplicados na direção  $y'$ , pelos fatores obtidos através da otimização híbrida para a direção  $y'$ . Com isso, foram obtidos os perfis das tensões normais na direção  $y'$  (FIGURA 58.b) para os 5 experimentos realizados.

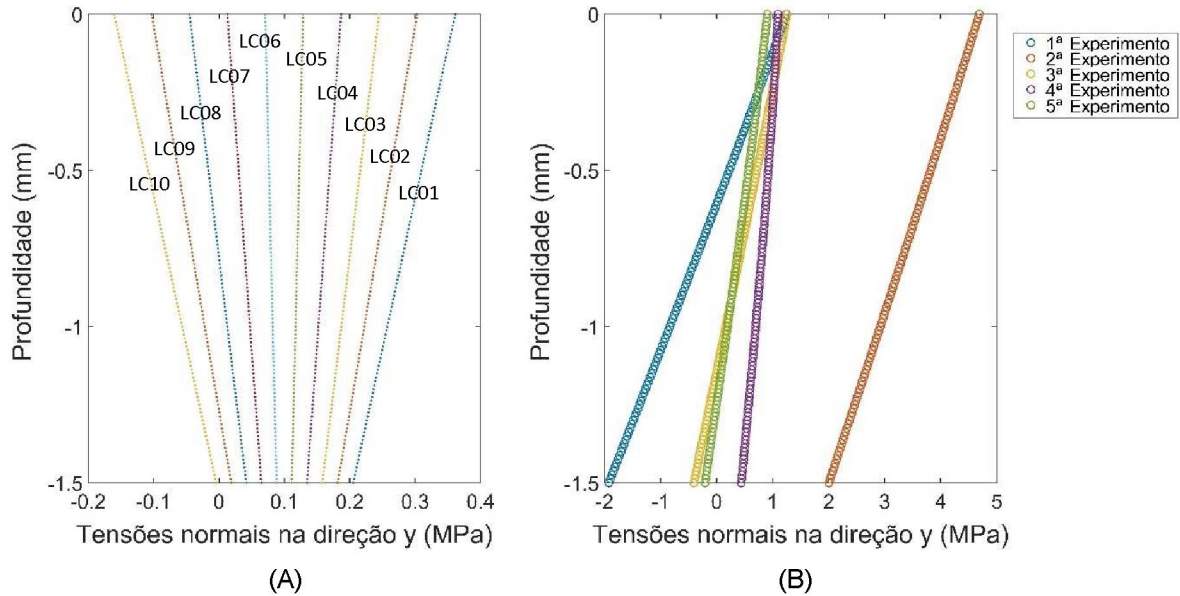
Para alcançar os perfis das tensões cisalhantes no plano  $xy'$ , foram multiplicadas as curvas das tensões obtidas via MEF (FIGURA 59.a), devido aos carregamentos aplicados no plano  $xy'$ , com os fatores encontrados através da otimização híbrida no plano  $xy'$  (FIGURA 59.b) para os 5 experimentos.

FIGURA 57 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO  $x'$  EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO  $x'$  POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO  $x'$  PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



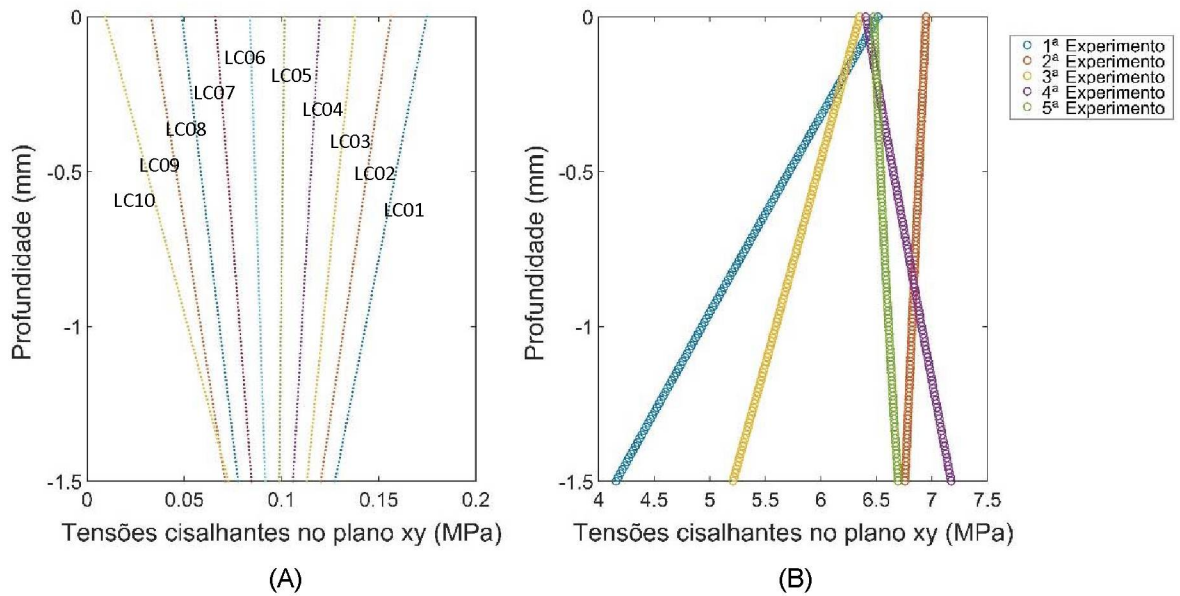
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 58 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO Y' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO Y' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO Y' PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 59 - PERFIL DE TENSÕES CISALHANTES NO PLANO XY' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NO PLANO XY' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO XY' PARA O CASO 1 (CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA).



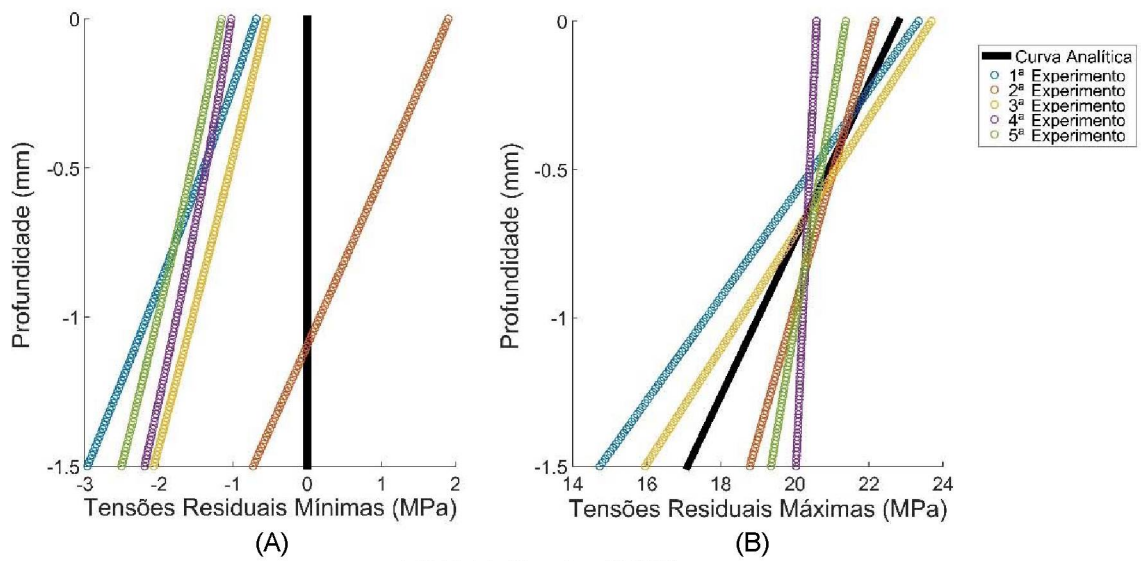
FONTE: O autor (2020).

A partir dos perfis de tensões normais e cisalhantes obtidos para o corpo de alumínio AA-6063 com uma força aplicada a 225 mm da roseta (caso 1), foram encontrados os perfis das tensões principais e as direções nas quais elas atuam (tendo como referência a direção indicada pelo eixo x') ao longo da profundidade dos

corpos de prova analisados. Com isso, a FIGURA 60 ilustra, conforme o caso 1, o comportamento das tensões principais ao longo da profundidade e a FIGURA 61 ilustra as suas direções.

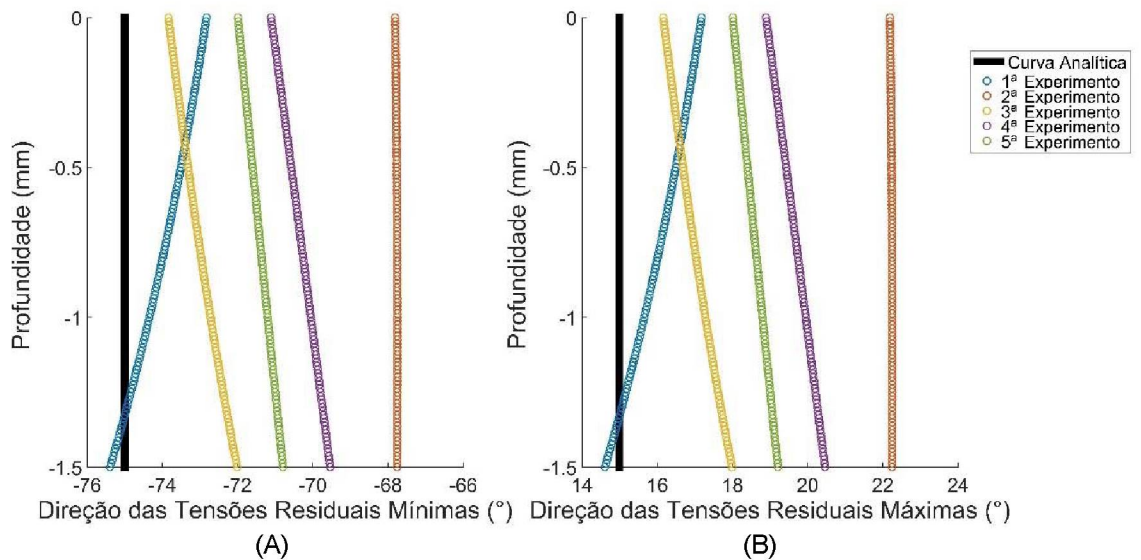
Percebe-se que, neste caso, como as DPR's extrapolaram os 10% considerado, as direções das tensões principais ficaram consideravelmente distantes dos valores analíticos esperados.

FIGURA 60 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 1. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 61 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 1. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

As tensões principais podem ser representadas na forma de elipses, nas quais os menores diâmetros correspondem às tensões residuais mínimas, os maiores diâmetros correspondem às tensões máximas e as rotações das elipses correspondem às direções das tensões máximas encontradas. As FIGURAS 89 a 98 (APÊNDICE R) apresentam o perfil de elipses ao longo da profundidade do componente para o caso 1 analisado.

### 8.2.2 Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 2

O caso 2 se refere a um corpo de alumínio com uma força aplicada a uma distância de 250 mm da região de medição, e que também foram obtidos 30 fatores para cada um dos 5 experimentos. Essa análise, assim como no caso 1, foi realizada considerando um sistema de coordenadas Cartesiano formado pelos eixos  $x'$  e  $y'$  (FIGURA 55.b). Esses fatores incluem aqueles vinculados às tensões normais na direção  $x'$ , às tensões normais na direção  $y'$  e às tensões cisalhantes no plano  $xy'$ , conforme mostra a TABELA 17.

TABELA 17 - FATORES OBTIDOS A PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

	Carregamentos na direção $x'$					Carregamentos na direção $y'$					Carregamentos no plano $xy'$				
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
LC01	440,9	-224,8	-324,6	-53,5	12,7	-1014	-1236	-1097	-906,5	-929,5	-144,8	15,8	117,6	26,5	-200,7
LC02	204,1	-132,8	194,0	-8,0	-115,7	-401,6	-1229	-808,8	-491,6	-430,4	117,9	-110,8	210,9	-105,9	1,7
LC03	159,3	50,9	-127,5	-62,5	116,1	89,9	229,9	58,0	173,0	76,2	52,2	-181,7	-226,9	-84,9	-46,0
LC04	180,8	112,4	189,3	-32,6	54,8	543,4	1057	891,7	498,5	754,7	84,2	258,7	-141,5	127,5	221,8
LC05	73,0	171,1	26,6	200,8	36,6	767,5	1150	1009	637,6	576,1	-45,5	225,9	16,7	101,1	321,2
LC06	5,5	197,6	105,7	58,3	23,0	737,1	1240	1016	665,7	588,9	136,9	87,5	57,9	170,7	117,7
LC07	82,8	263,2	458,2	267,7	-17,6	636,9	903,1	643,9	715,0	462,3	-37,4	-45,9	-170,7	51,1	-151,4
LC08	191,5	214,6	140,1	-30,4	80,0	134,0	343,5	90,6	284,1	397,8	-117,7	-205,0	107,4	-206,6	-102,7
LC09	-7,9	33,4	-220,4	85,9	41,4	-513,5	-1069	-714,8	-626,8	-619,2	-29,0	-34,6	-6,3	-42,3	-151,8
LC10	-302,6	-535,1	-284,7	-266,6	-113,3	-975,1	-1376	-1084	-937,4	-868,0	42,1	46,0	73,2	30,4	26,0

FONTE: O autor (2020).

Realizou-se a multiplicação das funções relativas às curvas das tensões normais na direção  $x'$  obtidas via MEF, apresentadas na FIGURA 62.a, devido aos carregamentos aplicados, pelos fatores relacionados à direção  $x'$  encontrados pelo processo de otimização. Assim, obtiveram-se os perfis das tensões residuais normais na direção  $x'$  (FIGURA 62.b), para os 5 experimentos.

Realizando o mesmo procedimento para as funções relativas às curvas das tensões normais na direção  $y'$  encontradas via MEF (FIGURA 63.a), obtiveram-se os perfis das tensões normais na direção  $y'$  (FIGURA 63.b), para os 5 experimentos.

FIGURA 62 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO  $x'$  EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO  $x'$  POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO  $x'$  PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.

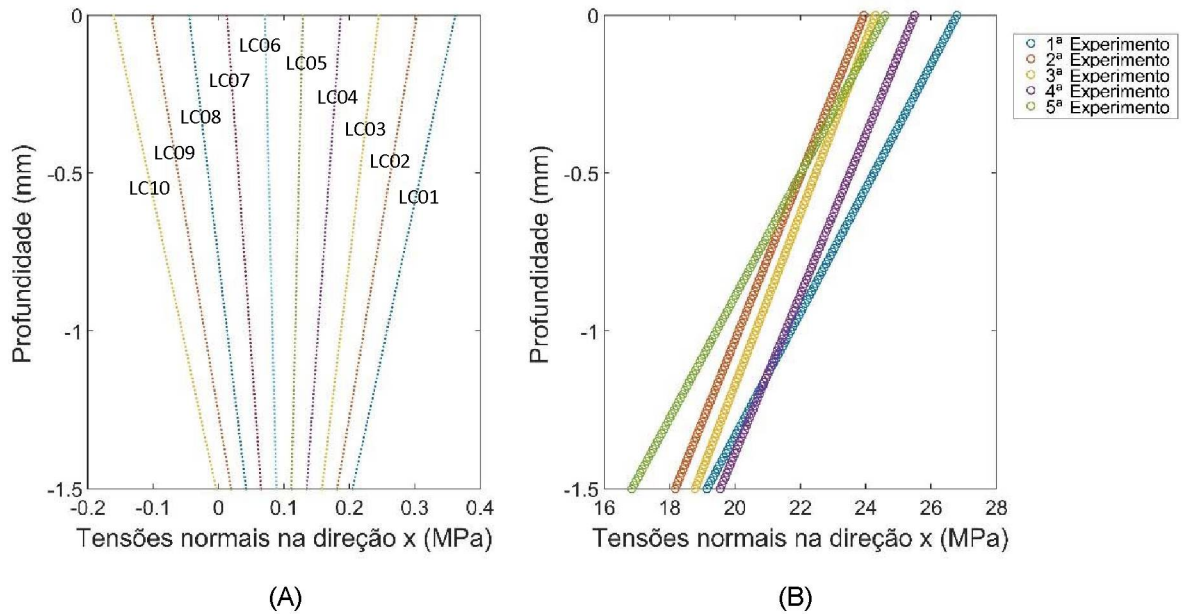
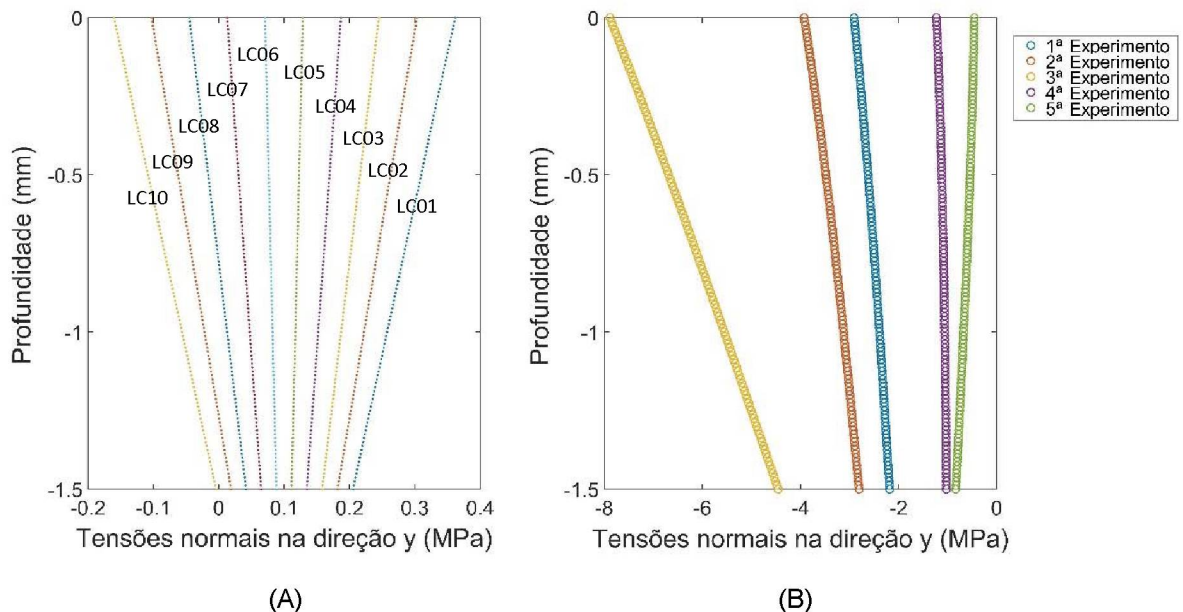
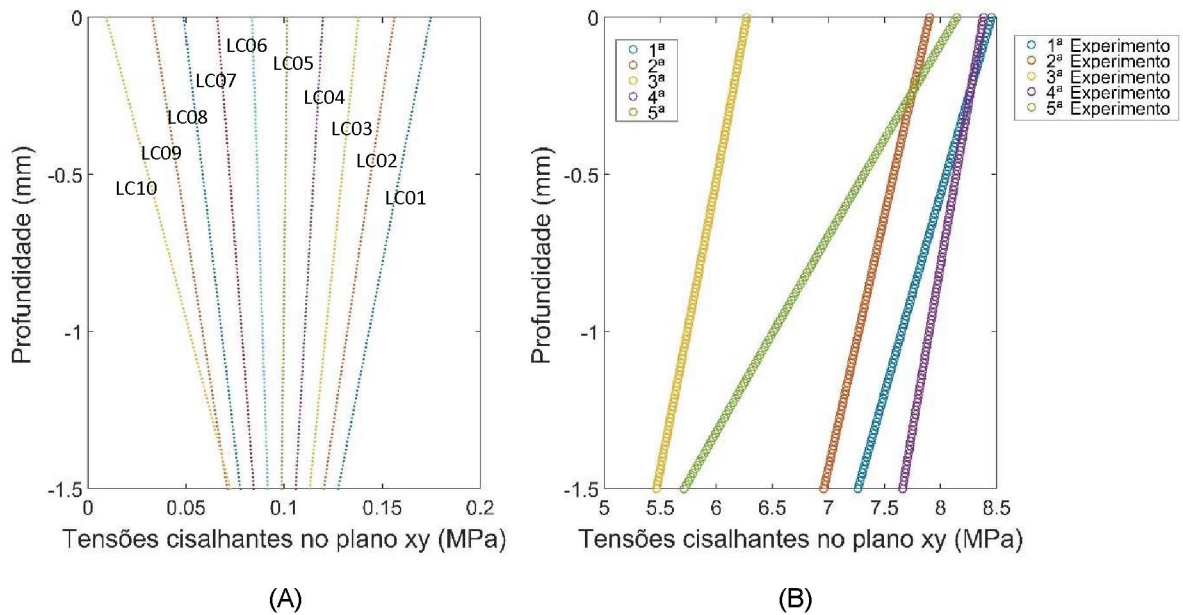


FIGURA 63 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO  $y'$  EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO  $y'$  POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO  $y'$  PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



As curvas das tensões cisalhantes encontradas via MEF (FIGURAS 64.a), devido aos carregamentos aplicados, foram multiplicadas pelos fatores obtidos para o plano  $xy'$ . Assim, foram obtidos os cinco perfis de tensões cisalhantes no plano  $xy'$ , para os cinco experimentos realizados, como mostradas na FIGURA 64.b.

FIGURA 64 - PERFIL DE TENSÕES CISALHANTES NO PLANO  $XY'$  EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO  $XY'$  POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO  $XY'$  PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.

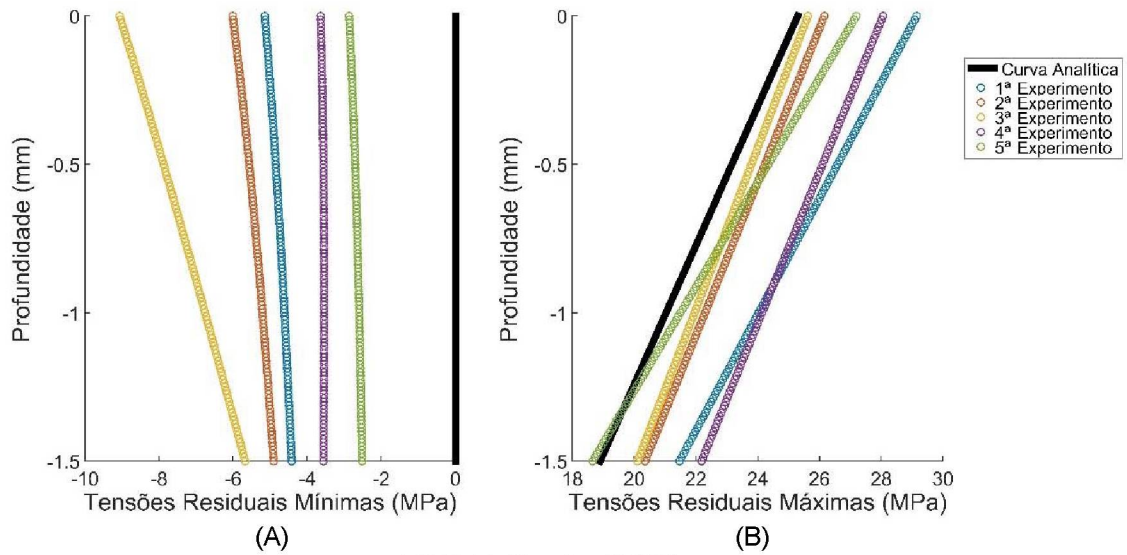


Com base nos perfis de tensões encontrados nas direções normais e cisalhantes para o caso 2 (corpo de alumínio AA-6063 com uma força aplicada a 250 mm da roseta), foram encontradas as tensões principais e as direções nas quais elas atuam ao longo da profundidade dos corpos de prova analisados. A FIGURA 65 ilustra, para o caso 2, o comportamento das tensões principais ao longo da profundidade. Por sua vez, a FIGURA 66 ilustra as direções principais. As tensões principais também podem ser representadas na forma de elipses, como apresentadas nas FIGURAS 99 a 108 (APÊNDICE R), para o caso 2.

No caso 2, a flexão causada no corpo induziu um perfil linear de tensões na direção longitudinal da barra ( $15^\circ$  da direção  $x'$ ), com uma variação de 25,3 MPa na superfície a 18,9 MPa na profundidade de 1,5 mm, como mostrado na FIGURA 65. Assim, observa-se que, como são conhecidas as tensões principais (curva preta), percebe-se que os perfis de tensões principais máximas, os quais foram obtidos a

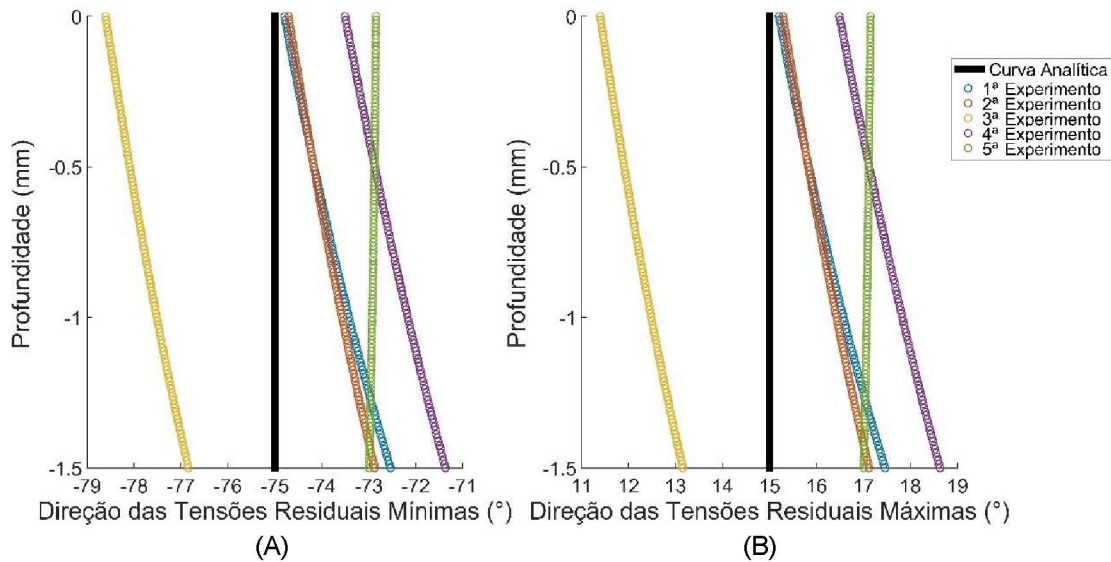
partir dos experimentos físicos, ficaram próximos da curva analítica. Os valores mais distantes da curva analítica tiveram uma diferença de aproximadamente 16%.

FIGURA 65 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 2 (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 66 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CASO 2. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

### 8.2.3 Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 3

O caso 3 (corpo de aço com uma força aplicada a uma distância de 225 mm da região de medição) também foi analisado. Aplicando o processo de otimização, foram obtidos 30 fatores para cada um dos 5 experimentos. Dentre eles, encontram-

se os fatores vinculados às tensões normais nas direções  $x'$  e  $y'$ , bem como os fatores relacionados às tensões cisalhantes no plano  $xy'$ , conforme mostra a TABELA 18.

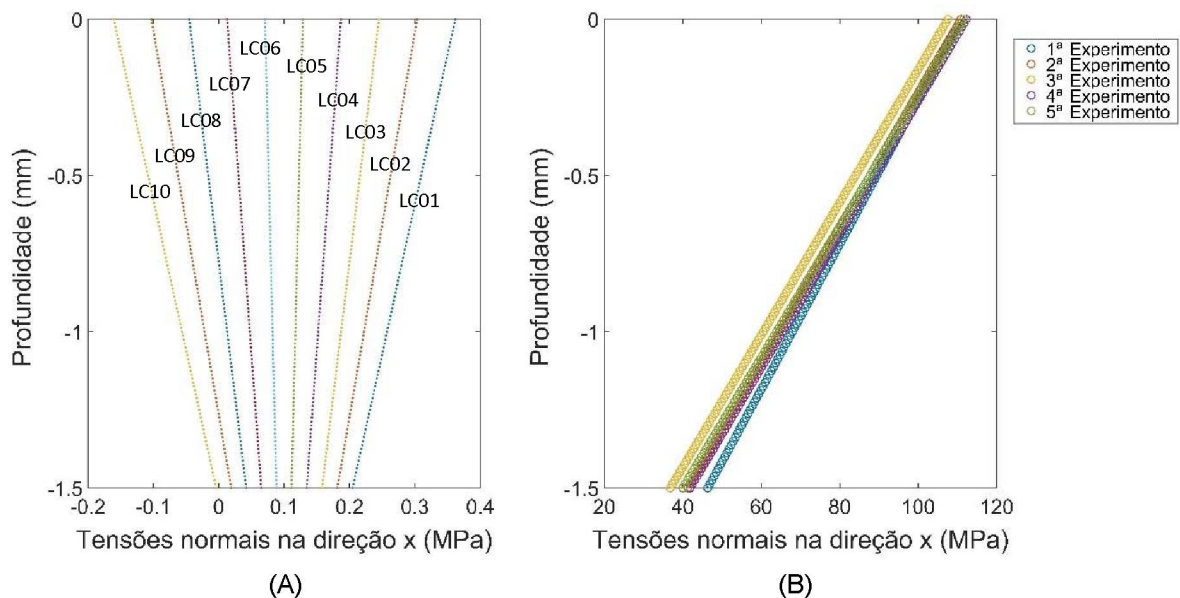
Realizando a multiplicação das curvas das tensões obtidas via MEF (FIGURAS 67.a, 68.a e 69.a), decorrentes dos carregamentos aplicados, pelos fatores obtidos através do processo de otimização, foram encontrados os perfis das tensões normais na direção  $x'$  (FIGURA 67.b) e na direção  $y'$  (FIGURA 68.b) e de tensões cisalhantes no plano  $xy'$  (FIGURA 69.b) para os cinco experimentos.

TABELA 18 - FATORES OBTIDOS A PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

	Carregamentos na direção $x'$					Carregamentos na direção $y'$					Carregamentos no plano $xy'$				
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
LC01	231,4	-752,1	-709,2	-616,6	330,0	-1049	-1419	-3888	-2853	-1278	-56,4	300,6	-15,5	345,9	746,8
LC02	371,1	661,8	-470,5	579,2	609,1	-1315	-281,9	-3296	-1412	453,0	-54,6	-63,0	-539,3	412,7	-173,6
LC03	68,6	-18,0	138,4	447,5	-721,5	-23,9	302,6	282,3	787,1	-377,5	539,6	-555,7	323,7	13,2	-341,7
LC04	-134,8	986,9	437,1	-186,6	-356,5	1084	586,9	3465	2098	204,3	-172,7	603,7	134,1	-33,2	-413,4
LC05	-462,0	-505,3	352,0	-155,7	300,4	1292	860,2	3330	1789	772,2	-12,9	-31,1	837,6	-847,8	-200,1
LC06	8,4	-497,8	877,2	175,0	-329,1	1219	869,8	3525	1846	878,4	-307,6	84,5	318,2	-48,8	651,8
LC07	632,8	443,0	688,2	379,6	106,9	672,4	552,6	3503	1285	186,1	520,7	293,7	-399,3	-116,9	88,8
LC08	690,8	438,6	809,1	12,9	302,5	293,6	226,9	417,4	-32,0	713,9	35,7	-563,9	-246,2	-192,5	-255,4
LC09	481,4	-203,4	-722,4	-360,4	-65,4	-533,3	-610,3	-3336	-1477	-82,9	-592,6	-177,9	-440,6	372,6	-185,4
LC10	-1384	-596,8	-1480	-319,1	-255,8	-1702	-1151	-4046	-2104	-1516	122,0	73,5	34,4	139,1	58,3

FONTE: O autor (2020).

FIGURA 67 - PERFIL DE TENSÕES: (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO  $X'$  POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO  $X'$  PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 68 - PERFIL DE TENSÕES: (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO Y' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO Y' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.

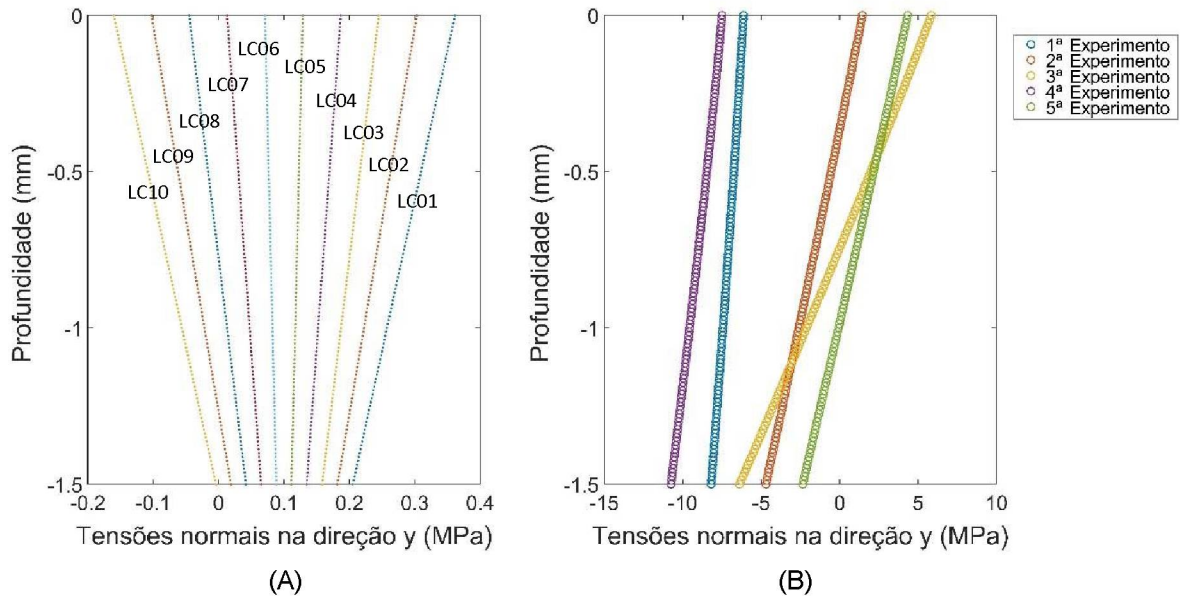
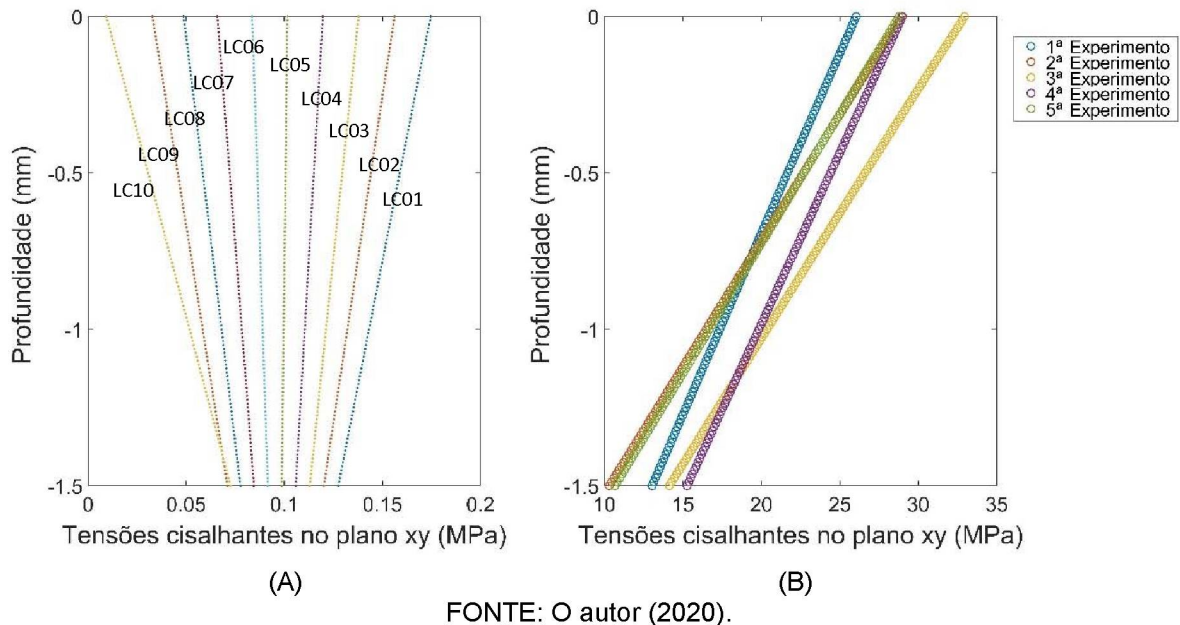


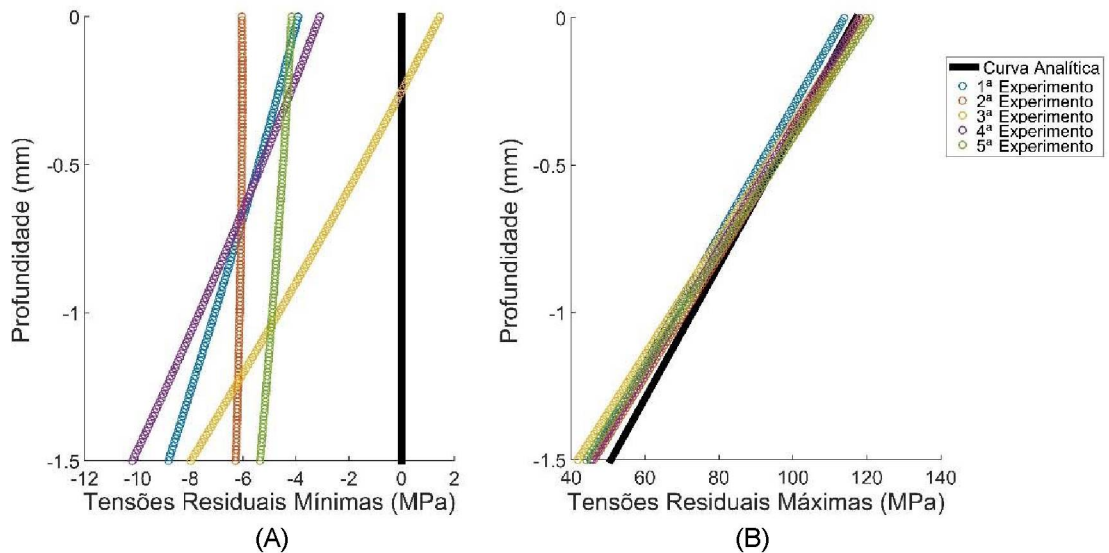
FIGURA 69 - PERFIL DE TENSÕES: (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO XY' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO XY' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



Com base nos perfis de tensões residuais encontrados nas direções normais e cisalhantes para o caso 3, foram obtidas as tensões principais e as respectivas direções ao longo da profundidade dos corpos de prova analisados. Considerando o caso 3, a FIGURA 70 ilustra o comportamento das tensões principais ao longo da profundidade e a FIGURA 71 apresenta as suas direções. Ademais, no caso 3,

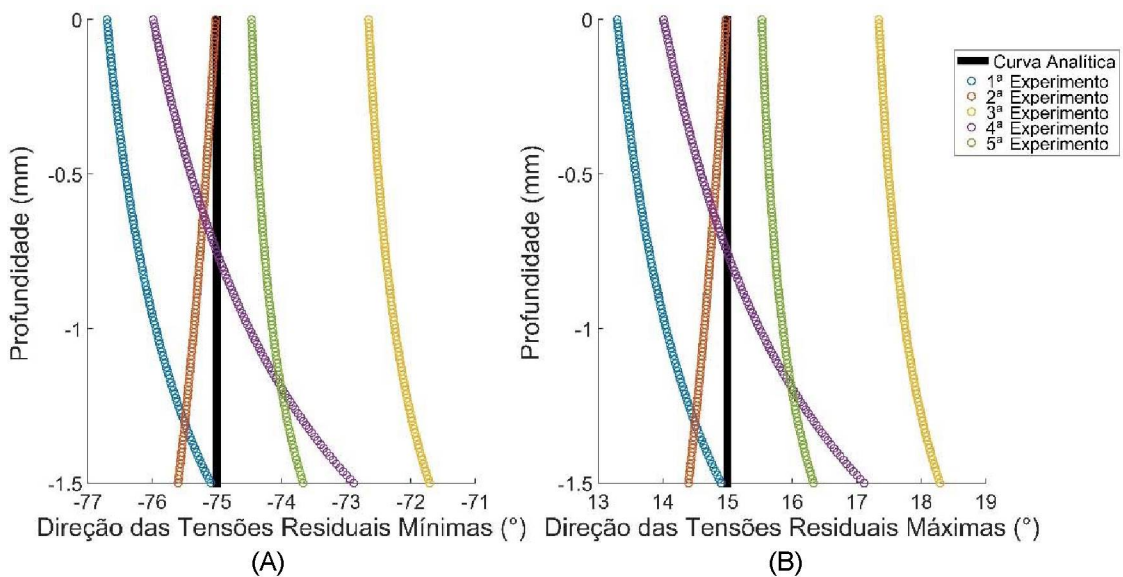
conforme mostram as FIGURAS 109 a 118 (APÊNDICE R), as tensões principais também podem ser representadas na forma de elipses, onde os diâmetros menores e maiores das elipses correspondem às tensões mínimas e máximas, respectivamente.

FIGURA 70 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 71 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

Neste caso, como mostrada na FIGURA 70, a variação do perfil linear de tensões máximas induzido foi de 117,1 MPa na superfície a 50,8 MPa na profundidade

de 1,5 mm. Assim, observa-se que os perfis das tensões máximas, obtidos a partir dos dados experimentais, ficaram próximos das tensões analíticas (curva preta), sendo que os valores mais distantes tiveram uma diferença de aproximadamente 14% em relação aos valores analíticos.

#### 8.2.4 Resultados obtidos com a metodologia proposta aplicada para o caso 4

O caso 4 trata de um corpo de aço com uma força aplicada a uma distância de 250 mm da região de medição. Aplicando o processo de otimização, foram encontrados 30 fatores para cada um dos 5 experimentos, dos quais incluem os fatores vinculados às tensões normais na direção  $x'$  e na direção  $y'$  e às tensões cisalhantes no plano  $xy'$ , conforme mostra a TABELA 19.

As curvas das tensões encontradas via MEF, conforme ilustram as FIGURAS 72.a, 73.a e 74.a, devido aos carregamentos aplicados, foram multiplicadas pelos fatores encontrados pelo processo de otimização. Assim, obtiveram-se, para os cinco experimentos realizados, os perfis de tensões normais nas direções  $x'$  (FIGURA 72.b) e  $y'$  (FIGURA 73.b) e de tensões cisalhantes no plano  $xy'$  (FIGURA 74.b).

TABELA 19 - FATORES OBTIDOS A PARTIR DOS CARREGAMENTOS APLICADOS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

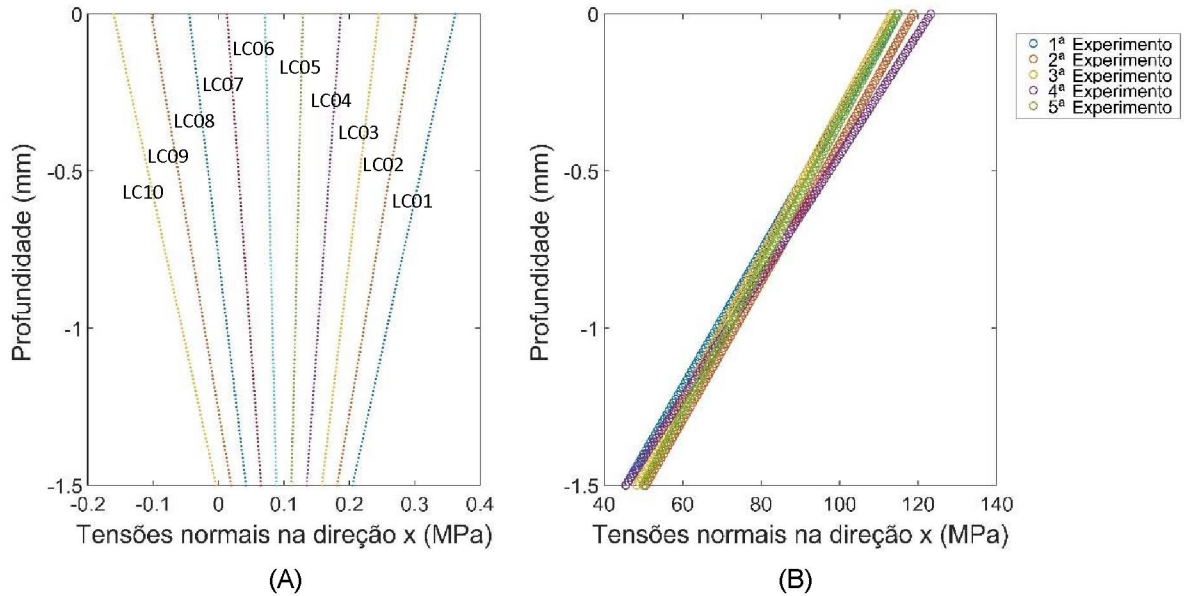
	Carregamentos na direção $x'$					Carregamentos na direção $y'$					Carregamentos no plano $xy'$				
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
LC01	652,7	543,4	172,9	447,7	-407,5	-2404	-2729	-3764	-3614	-4343	283,9	606,8	502,9	668,0	15,2
LC02	707,2	42,6	36,6	-1084	-110,8	-1352	-2297	-2110	-2965	-4519	236,2	-24,9	-119,9	-492,5	-16,7
LC03	186,6	-495,9	-407,6	84,3	-166,0	69,4	818,8	543,5	524,0	1001	-482,8	-722,8	-641,5	117,1	-182,2
LC04	378,1	-82,5	607,5	262,1	110,7	1691	2096	2366	2857	3881	357,0	557,9	510,6	472,1	47,7
LC05	-387,1	15,0	-688,1	7,8	221,3	1939	2231	3087	3135	4154	29,3	138,8	495,4	-312,4	591,4
LC06	-337,7	-439,9	36,8	489,0	735,8	1833	2275	2705	3387	4186	-163,9	-686,9	-287,2	-241,7	412,4
LC07	185,9	538,8	142,8	519,2	435,3	1526	1832	2322	2279	3701	-478,6	145,6	-671,1	-74,8	76,6
LC08	425,8	582,6	1112	608,0	1149	813,4	230,3	1265	1054	94,7	424,2	140,2	169,9	-539,4	-806,5
LC09	45,9	-172,4	116,3	-288,1	-350,5	-1460	-1781	-2899	-2710	-3679	-374,4	-359,7	-38,3	193,7	-222,0
LC10	-450,0	-480,3	-1075	-1097	-1532	-2683	-2717	-3525	-3978	-4474	136,7	186,1	111,5	128,6	109,5

FONTE: O autor (2020).

No caso 4, a partir dos perfis de tensões encontradas nas direções normais e cisalhantes em relação ao sistema de coordenadas  $x'-y'$ , foram obtidas as tensões principais (FIGURA 75) e as respectivas direções (FIGURA 76). Além disso, no caso

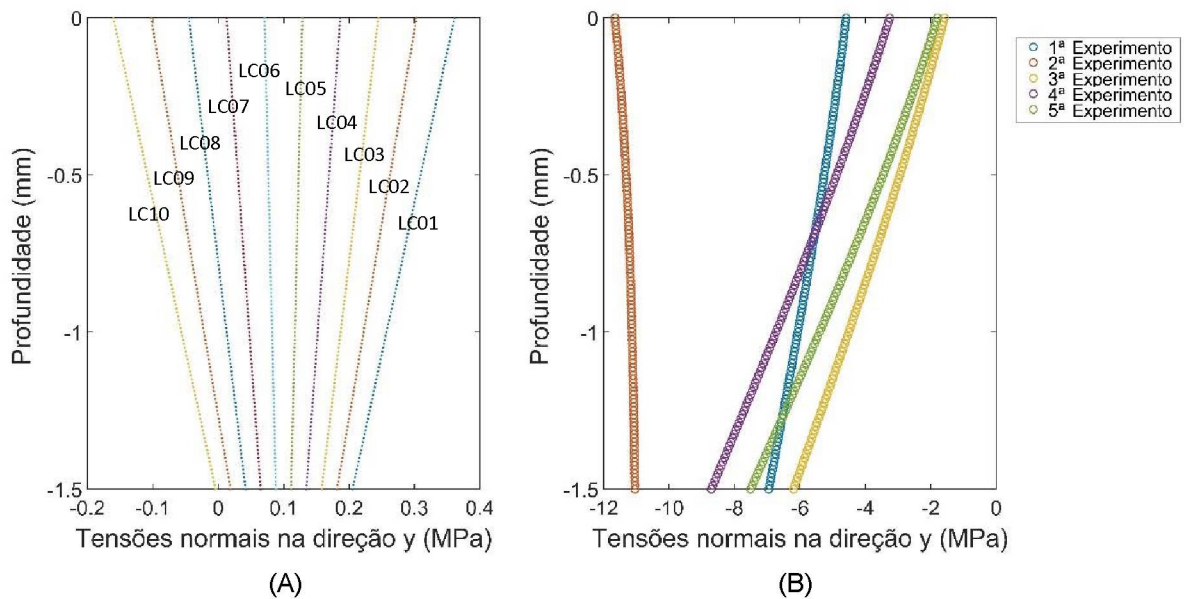
4, conforme mostram as FIGURAS 119 a 128 (APÊNDICE R), as tensões principais também podem ser representadas na forma de elipses.

FIGURA 72 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO X' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO X' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO X' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



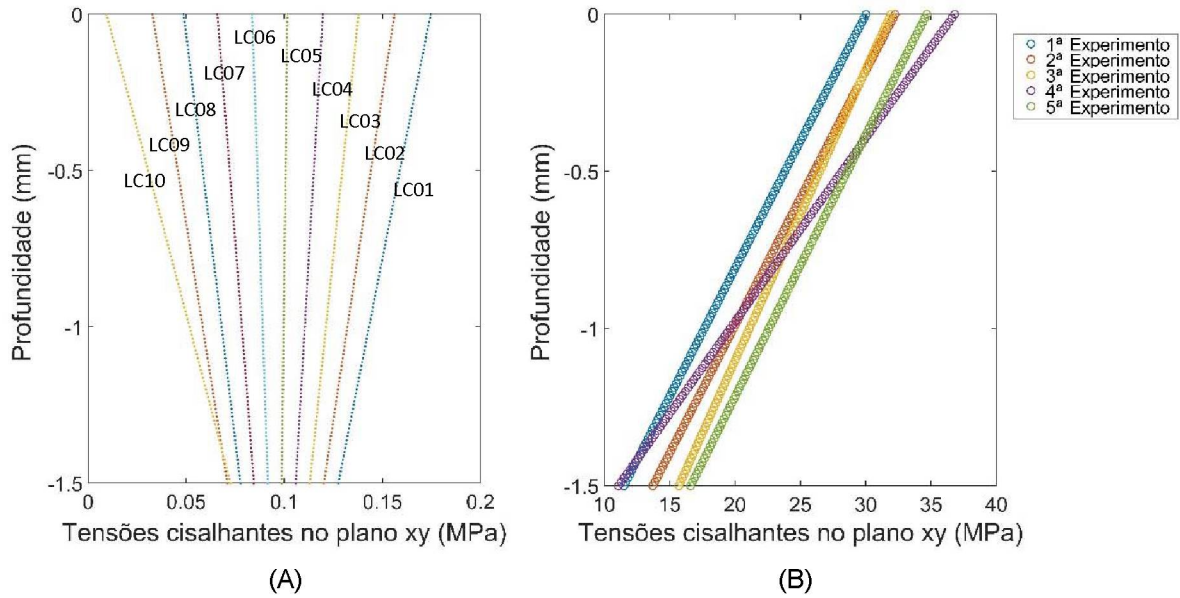
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 73 - PERFIL DE TENSÕES NORMAIS NA DIREÇÃO Y' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO Y' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NA DIREÇÃO Y' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



FONTE: O autor (2020).

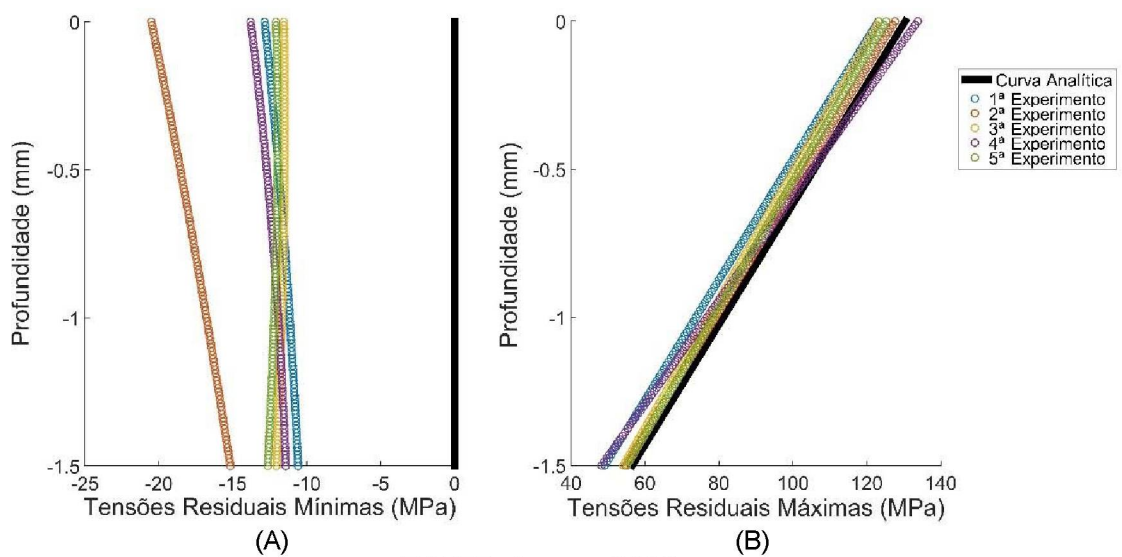
FIGURA 74 - PERFIL DE TENSÕES CISLHANTES NO PLANO XY' EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE. (A) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO AOS CARREGAMENTOS APLICADOS NA DIREÇÃO XY' POR MEIO DO MEF. (B) TENSÕES OBTIDAS NO PLANO XY' PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



FONTE: O autor (2020).

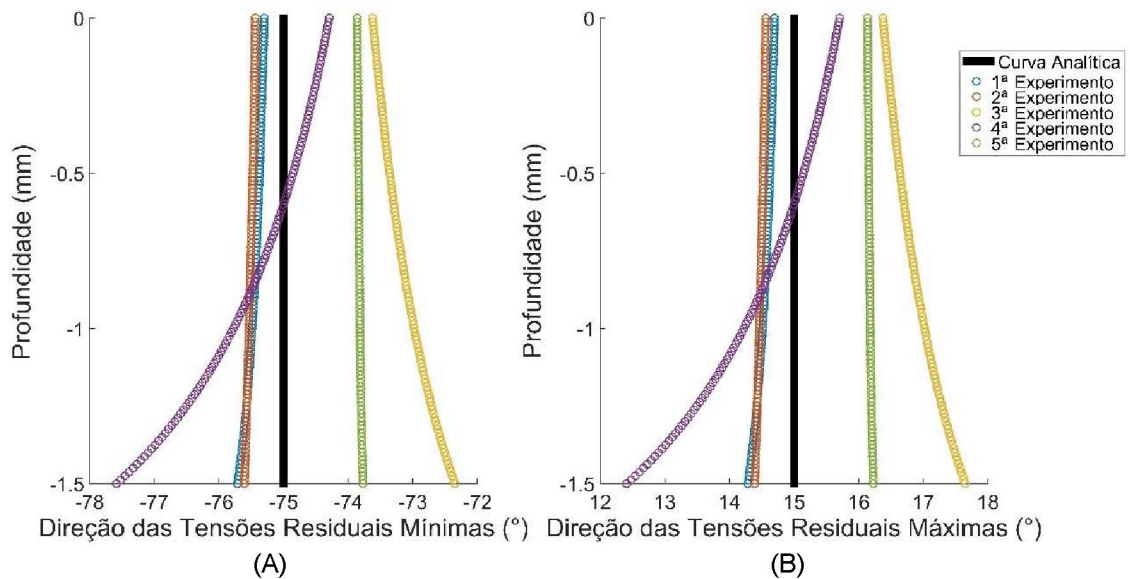
Como nos casos anteriores, nota-se que as curvas das tensões principais máximas, construídas a partir das deformações relaxadas, apresentaram valores próximos dos valores presentes na curva analítica (curva preta), como pode ser observado na FIGURA 75.

FIGURA 75 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 76 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

### 8.2.5 Análise da proximidade entre os valores experimentais medidos e a média destes valores

Após a obtenção de todos os perfis de TR para os quatro casos, foi aplicado o conceito de raiz do erro quadrático médio (RMSE) com o intuito de examinar a proximidade entre os valores experimentais medidos e o valor médio destes valores. Com isso, são destacados os resultados com os dados experimentais mais próximos da média, os quais mostram resultados com menor variação em relação ao valor médio (TABELA 20). Vale ressaltar que não foi analisado o RMSE do caso 1 por ter sido rejeitado pela análise do DPR (OWEN, 2010).

TABELA 20 - RESULTADOS DO RMSE

	1ª Exp.	2ª Exp.	3ª Exp.	4ª Exp.	5ª Exp.
Caso 1	1,604E-06	<b>3,459E-07</b>	2,080E-06	8,646E-07	4,115E-07
Caso 2	1,562E-06	9,205E-07	1,580E-06	6,916E-07	<b>6,649E-07</b>
Caso 3	1,793E-06	1,233E-06	8,752E-07	2,469E-06	<b>8,413E-07</b>

FONTE: O autor (2020).

Os valores da RMSE correspondem o quão os valores experimentais estão próximos ou distantes do valor médio entre eles. Logo, quando maior o valor da RMSE, maior são os resíduos presentes no conjunto de dados experimentais e, por

outro lado, quanto menor o valor da RMSE, menor são os resíduos presentes no conjunto de dados experimentais.

Com a aplicação da metodologia proposta, a partir da utilização do MEF e do método de otimização híbrida, que combinam AG e PNL, os comportamentos das TR foram mostrados graficamente para cada caso. Esses perfis de TR são contínuos, não-uniformes e se estendem a valores de profundidades superiores àqueles estipulados pelo método do furo cego padrão (ASTM E837-13, 2013), com a utilização das rosetas do tipo B. Sendo assim, os perfis de TR obtidos neste trabalho reproduzem as tensões mais próximas da realidade, uma vez que em cada camada infinitesimal há um valor de tensão residual distinto. Entretanto, o método de teste padrão apresenta as TR constantes por partes de modo que não possibilita avaliar a evolução contínua das TR ao longo da profundidade de um componente.

O critério do RMSE é adotado para selecionar um conjunto de dados experimentais para cada caso, os quais são utilizados na comparação entre os perfis de TR obtidos pela aplicação da metodologia proposta e os perfis de TR obtidos pela aplicação do método do furo cego modificado.

#### 8.2.6 Comparação da metodologia proposta com o método do furo cego modificado

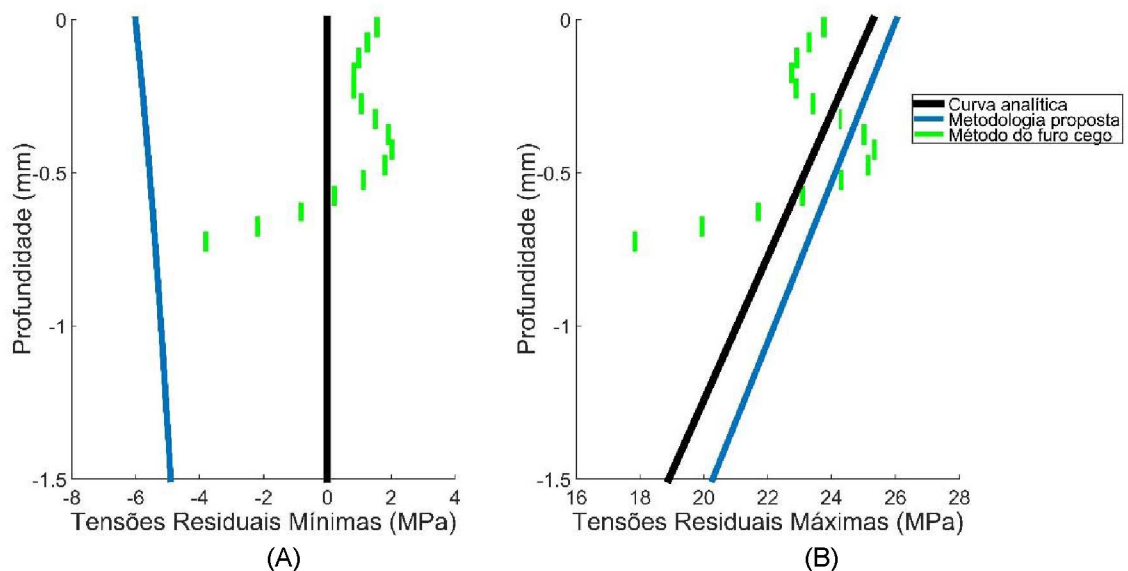
Esta seção tem como meta realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta neste trabalho e aqueles obtidos pela aplicação do método do furo cego modificado. Com o propósito de selecionar apenas um conjunto de experimentos em cada um dos casos, os experimentos que apresentaram menor valor do RMSE são destacados (TABELA 20) e esses são utilizados nessa análise comparativa. Para tanto, os resultados dos perfis de TR obtidos com a metodologia proposta neste trabalho foram comparados com resultados obtidos devido à aplicação do método do furo cego modificado (ALINAGHIAN; ALINAGHIAN; HONARPISHEH, 2019; HOSSEINI; AKBARI; SHOKRIEH, 2019; ROSSINI *et al.*, 2012). Essa modificação considera a aplicação do método de regularização de Tikhonov (APÊNDICE C) e do método de correção devido à plasticidade localizada (APÊNDICE D). O método de regularização é associado ao método do furo cego com o objetivo em determinar uma solução mais suavizada, sabendo que existem ruídos que causam flutuações aleatórias e que diminuem a precisão dos resultados (AZIKRI DE DEUS; CLAUDIO; BELO, 2012; FAGHIDIAN,

2014). Por sua vez, o método de correção pela consideração da plastificação localizada é combinado com o método do furo cego para corrigir os efeitos de plastificação em torno do furo, os quais podem influenciar nos resultados obtidos, podendo causar erros significativos. Isso porque o método original considera um material em um regime linear e elástico (MAHMOUDI *et al.*, 2011; SEIFI; SALIMI-MAJD, 2012).

As FIGURAS 77 e 78 ilustram o perfil de TR ao longo da profundidade e as suas direções para o caso 2 (corpo de prova de alumínio com uma força aplicada a 250 mm da roseta). As curvas em preto correspondem aos valores analíticos, as curvas em azul, aos valores calculados através da metodologia proposta neste trabalho, e os segmentos de retas na direção vertical em verde, referem-se às tensões obtidas através do método do furo cego modificado.

No caso 3 (corpo de prova de aço com uma força aplicada a 225 mm da roseta), os perfis de TR e as suas direções são ilustrados nas FIGURAS 79 e 80. Por sua vez, no caso 4 (corpo de prova de aço com uma força aplicada a 250 mm da roseta), os perfis de TR e as suas direções são ilustrados nas FIGURAS 81 e 82.

FIGURA 77 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 2. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.

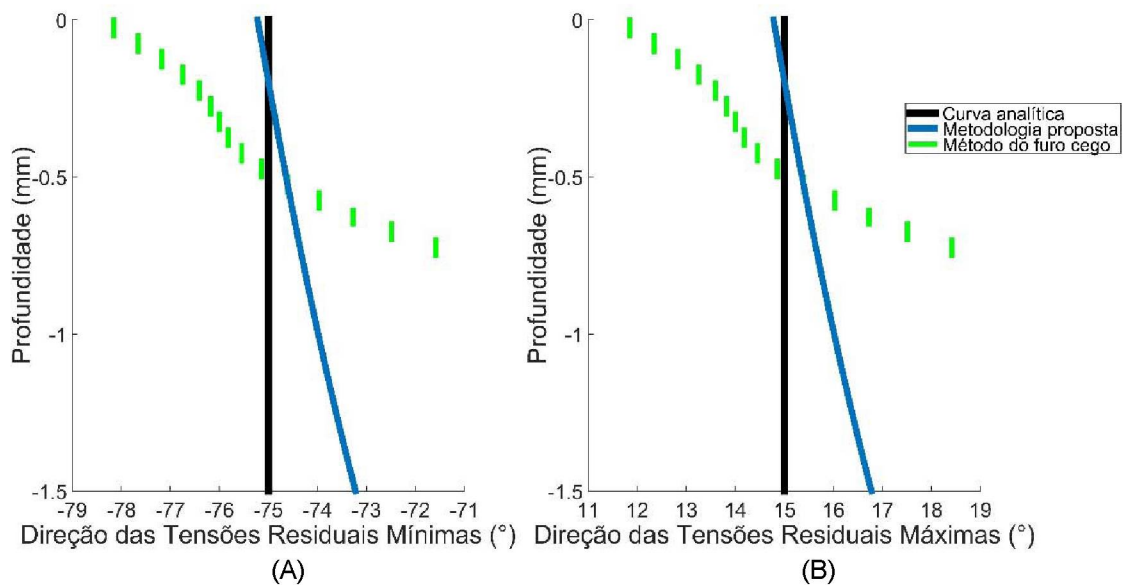


FONTE: O autor (2020).

Na liga de alumínio AA-6063, os compostos  $Mg_2Si$  (siliceto de magnésio) solubilizados na matriz de alumínio são precipitados, decorrente do tratamento de envelhecimento, formando compostos intermetálicos  $Mg_2Si$ . Esses precipitados proporcionam um aumento da dureza do material. (AKHLAGHI; NOGHANI; EMAMY,

2015; AKRAMI; NASIRI; KULISH, 2020; QIN *et al.*, 2020). Como a distribuição não é homogênea, podem existir regiões de alta dureza e/ou regiões de baixa dureza. Durante o processo de perfuração, devido às regiões de alta dureza, combinado com as rotações elevadas, há um aquecimento na região da peça onde é perfurada. Com isso, uma zona termicamente afetada tem as suas propriedades microestruturais alteradas devido ao calor induzido oriundo das operações de corte. Logo, a presença do intermetálico pode justificar o porquê da dispersão no caso do alumínio AA-6063.

FIGURA 78 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 2. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



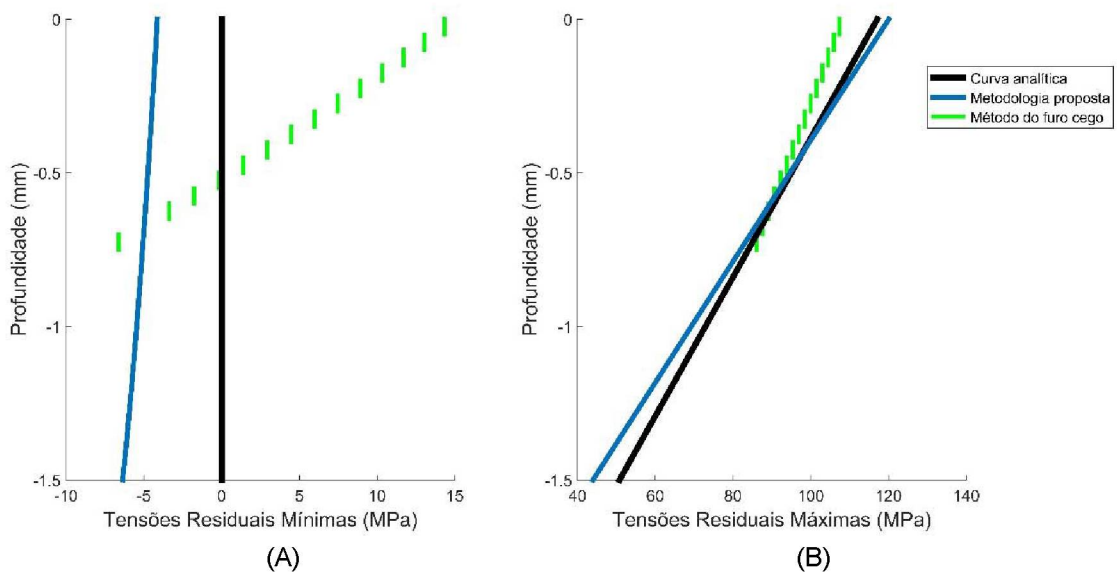
FONTE: O autor (2020).

Durante o processo de perfuração, devido forte atrito na interface entre o cavaco e a ferramenta, combinado a elevada temperatura, houve um acúmulo pequenas partículas do material usinado, depositando-se no gume de corte da broca, denominando-se gume postiço (CHATHA; PAL; SINGH, 2016; GÓMEZ-PARRA; ÁLVAREZ-ALCÓN; SALGUERO, 2013). A formação desse gume postiço dificultou as perfurações durante o processo, principalmente nos últimos incrementos, pela perda da eficiente do corte, impactando na dispersão dos valores apresentados.

Conforme ilustram as FIGURAS 77 a 82, a partir das deformações medidas pelos extensômetros até uma profundidade de 0,75 mm, foi possível construir o perfil de TR composto por segmentos de retas verticais (verde) com valores que se estendem até uma profundidade de 0,75 mm, conforme estabelecido pelo método do furo cego modificado. Aplicando a metodologia proposta neste trabalho, foi construído

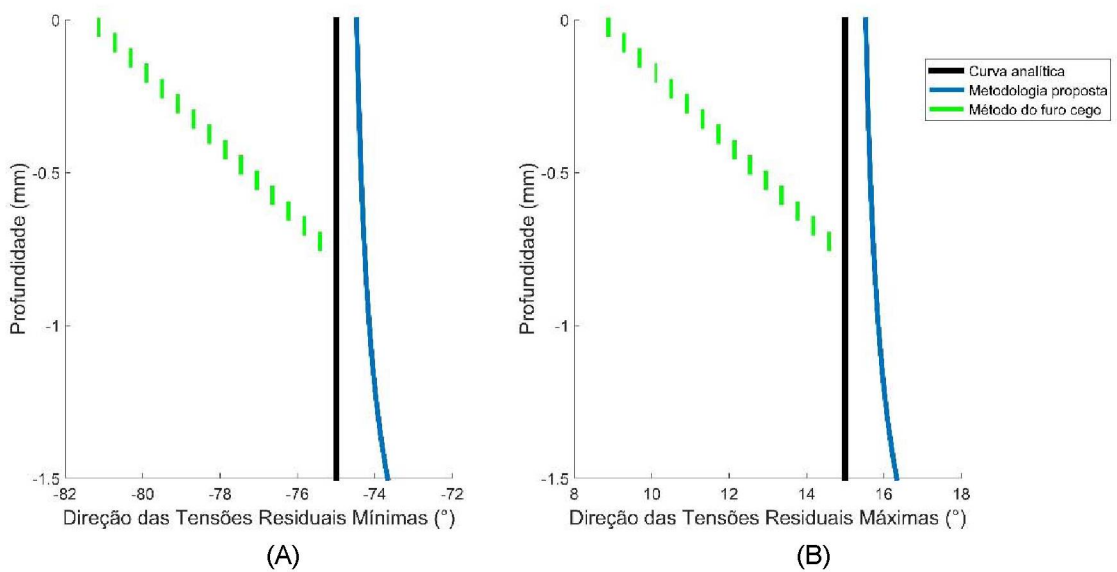
o perfil (azul) de TR não-linear e contínuo com valores que se estendem até uma profundidade de 1,5 mm, ou seja, obtiveram-se valores que vão além da profundidade perfurada. Assim, os resultados apresentados com a metodologia proposta mostram uma continuidade do perfil, um aumento da profundidade prevista além daquela medida e também uma proximidade com a solução analítica.

FIGURA 79 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 3. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



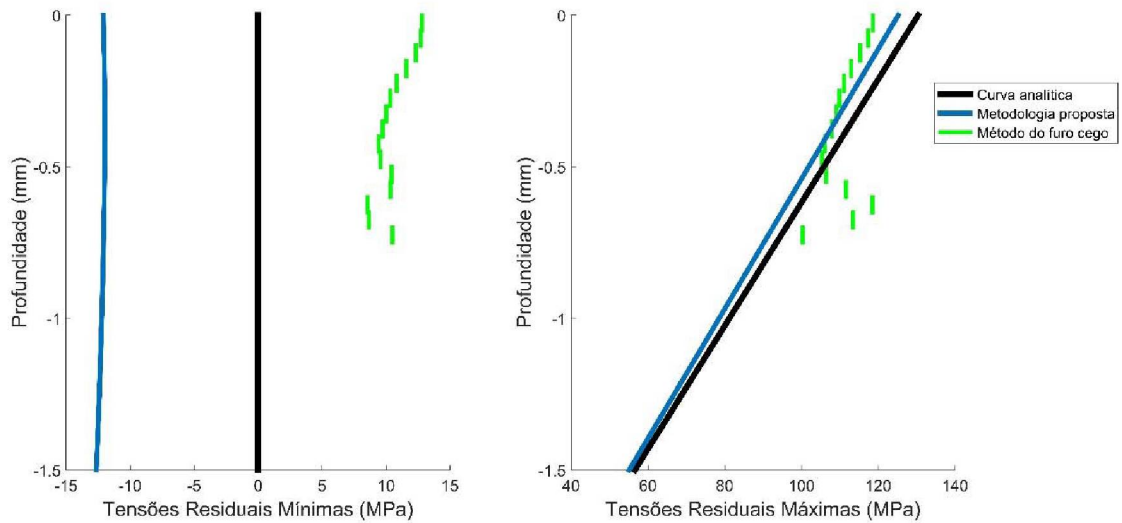
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 80 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 3. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 81 - PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 4. (A) TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.

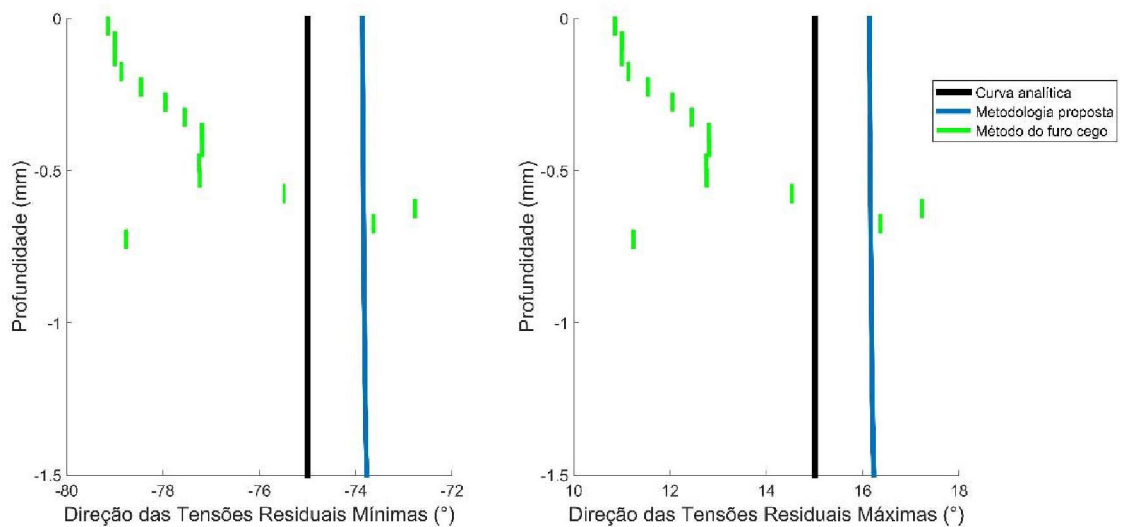


(A)

(B)

FONTE: O autor (2020).

FIGURA 82 - DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO CASO 4. (A) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÍNIMAS. (B) DIREÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS MÁXIMAS.



(A)

(B)

FONTE: O autor (2020).

Enquanto que no método do furo cego modificado, as tensões apresentadas ao longo do perfil podem ter variações bruscas de uma camada para outra (apresentando grandes discontinuidades), na metodologia proposta neste trabalho, o perfil de TR é contínuo ao longo da profundidade do componente.

No perfil de TR, com a metodologia proposta e aplicada neste trabalho, notou-se que as tensões máximas ficaram muito próximas das tensões máximas analíticas.

Como apresentado na FIGURA 77, os valores do perfil de TR máxima para o caso 2 ficaram entre 2,9% e 7,3% em relação aos valores do perfil analítico. No caso 3, conforme ilustra a FIGURA 79, os valores do perfil de TR máxima ficaram entre 2,6% e 13,4% em relação aos valores do perfil analítico. Por sua vez, no caso 4, conforme mostra a FIGURA 81, os valores do perfil de TR máxima ficaram entre 3,8% a 4,6% em relação aos valores do perfil analítico. Essas diferenças apresentadas nos valores encontrados podem ser oriundas de diversos fatores, tais como:

- Temperatura ambiente;
- Deslocamento radial da broca durante a perfuração, devido aos parafusos prisioneiros afrouxarem, uma vez que a rosca interna estava danificada;
- Desgaste da ponta da broca utilizada para execução dos furos;
- Manuseio do tambor graduado micrométrico, utilizado para o avanço em cada incremento de perfuração;
- Propriedades dos materiais não serem exatamente aquelas catalogadas;
- Defeitos micrométricos internos do material;
- Posicionamento das rosetas coladas com o adesivo instantâneo;
- Sensibilidade dos extensômetros, usados para medir o alívio das deformações;
- Vibrações durante o processo de perfuração;
- Ruídos presentes nos cabos elétricos que ligam os terminais de solda à entrada do sistema de aquisição de dados.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo de considerações finais é relatado, de forma resumida, as conclusões desta tese, destacando as principais contribuições e as recomendações para trabalhos futuros sobre o assunto abordado.

### 9.1.1 Conclusões

Esta tese trata do desenvolvimento de uma metodologia que tem como propósito a construção de um perfil de TR com variação contínua ao longo da profundidade de um componente analisado.

Com os dados das deformações relaxadas provenientes do MEF devido à aplicação de carregamentos baseados em funções de forma, desenvolveu-se um código no ambiente *matlab*® onde foram introduzidos esses dados numéricos em um processo de otimização híbrida, na qual utilizou a busca por AG e a técnica de PNL. Durante a realização dos experimentos físicos, foram medidas as deformações relaxadas em três direções por três extensômetros com uma roseta do Tipo B e, essas deformações relaxadas foram incorporadas no processo de otimização. Como resultado desse processo de otimização híbrida, obteve-se os fatores amplificadores os quais foram utilizados para multiplicar pelos perfis de tensões gerados via o MEF. Com a multiplicação dos fatores amplificadores pelas tensões induzidas, fez-se uma superposição das tensões amplificadas que estavam na mesma direção. Assim, obteve-se os perfis de tensões nas direções normais e nas direções cisalhante para cada camada adjacente do componente analisado, considerando um estado plano de tensão para cada camada. Portanto, foram encontradas as tensões principais e as suas direções e, com isso, construído um perfil de tensões elásticas ao longo da profundidade do componente analisado.

Conforme proposto no trabalho, obteve-se um perfil de TR contínuo e não uniforme ao longo da profundidade com as tensões principais explicitadas, diferenciando-as como tensões mínimas e tensões máximas e, as direções onde elas atuavam para cada camada. O perfil encontrado se estendeu além da profundidade além das camadas perfuradas. Com deformações relaxadas oriundas de perfurações incrementais até uma profundidade de 0,75 mm foi possível obter o perfil de TR até

uma profundidade de 1,5 mm que vai além da profundidade máxima que a norma ASTM 837-13 adota com a utilização de uma roseta do tipo B.

Comparando as curvas obtidas para o aço AISI 1025 com as curvas obtidas para o alumínio AA-6063, os resultados mais dispersantes foram evidenciados no caso do alumínio. Tanto a presença do intermetálico  $Mg_2Si$ , na liga de alumínio, como a formação desse gume postiço, durante o processo de perfuração, influenciaram nos resultados, dificultando as perfurações durante o processo, principalmente nos últimos incrementos.

Considerando que essa metodologia proposta não traz nenhum acréscimo financeiro para as medições das deformações comparado ao método do furo cego modificado e, que a forma de processamento dos dados é efetuada por intermédio de um código desenvolvido em *matlab*®, essa metodologia pode ser classificada como uma ferramenta viável para construir perfis de TR.

A precisão das TR máximas ao longo da profundidade do componente, ficaram bem próximas das tensões analíticas induzidas pelo peso conhecido utilizado nos experimentos físicos. No entanto, diferentemente do método do furo cego modificado, as curvas de TR obtidas apresentaram continuidade ao longo da profundidade do componente.

#### 9.1.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como alternativas e sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- I. Testa a metodologia com outros tipos de materiais como, por exemplo, cobre, latão e bronze, e também realizar experimentos com a junção de dois tipos de materiais;
- II. Avançar a metodologia para materiais anisotrópicos;
- III. Testar a metodologia em ligas de alumínio com diferentes teores de magnésio e silício;
- IV. Aplicar um maior número de carregamentos normais e cisalhantes ao longo da profundidade do modelo construído pelo MEF;
- V. Testar a metodologia proposta para uma situação onde haja tensões cisalhantes oriundas de carregamentos torcionais;

- VI. Implementar, de forma combinada, o método de regularização e o método de correção devido à plastificação, à metodologia proposta neste trabalho;
- VII. Testar o método em casos mais complexo, como em superfícies com tensões compressivas induzidas por shot peening, por exemplo;
- VIII. Utilizar outro método mais preciso para comparar com a metodologia proposta.

## REFERÊNCIAS

AKHLAGHI, A.; NOGHANI, M.; EMAMY, M. The Effect of La-intermetallic Compounds on Tensile Properties of Al-15%Mg<sub>2</sub>Si In-situ Composite. **Procedia Materials Science**, v. 11, p. 55–60, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.085>

AKRAMI, A.; NASIRI, N.; KULISH, V. Fractal dimension analysis of Mg<sub>2</sub>Si particles of Al-15%Mg<sub>2</sub>Si composite and its relationships to mechanical properties. **Results in Materials**, v. 7, n. July, p. 100118, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100118>

ALINAGHIAN, M.; ALINAGHIAN, I.; HONARPISHEH, M. Residual stress measurement of single point incremental formed Al/Cu bimetal using incremental hole-drilling method. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, v. 2, n. 2, p. 131–139, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.04.003>

ARORA, J. S. Introduction to Optimum Design. *In: Introduction to Optimum Design*. 4. ed. San Diego: Elsevier, 2017. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800806-5.00001-9>

ASTM E 837-08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method. **ASTM E 837-08**, West Conshohocken, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0837-13A.2>

ASTM E 837-13. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method. **ASTM E 837-13a**, West Conshohocken, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/E0837-13A.2>

ATTOUCH, H.; CHBANI, Z.; RIAHI, H. Combining fast inertial dynamics for convex optimization with Tikhonov regularization. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, v. 457, n. 2, p. 1065–1094, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2016.12.017>

AUCEJO, M.; DE SMET, O. A Multiplicative Regularization for Force Reconstruction. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 85, p. 730–745, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.11.026>

AZIKRI DE DEUS, H. P.; CLAUDIO, C. R.; BELO, I. M. The Tikhonov regularization method in elastoplasticity. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, n. 10, p. 4687–4707, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.086>

BABAEIAN, M.; MOHAMMADIMEHR, M. Investigation of the time elapsed effect on residual stress measurement in a composite plate by DIC method. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 128, n. October 2019, p. 106002, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106002>

BAJAJ, P.; HARIHARAN, A.; KÜRNSTEINER, P. Steels in additive manufacturing: A review of their microstructure and properties. **Materials Science and Engineering A**, v. 772, n. October 2019, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138633>

BARTLETT, M. S. Properties of Sufficiency and Statistical Tests. **The Royal Society Publishing**, v. 160, p. 268–282, 1937.

BEANEY, E. M. Accurate Measurement of Residual Stress on any Steel Using the Centre Hole Method. **Central Electricity Generating Board**, Gloucestershire, n. July, p. 99–106, 1976.

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; MONELLI, B. D. Experimental parameter sensitivity analysis of residual stresses induced by deep rolling on 7075-T6 aluminium alloy. **Surface and Coatings Technology**, v. 254, p. 175–186, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.06.008>

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; MORI, L. F. Genetic Algorithm Optimization of the Hole-Drilling Method for Non-Uniform Residual Stress Fields. **Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 44, n. 1, p. 105–115, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1243/03093247JSA457>

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; MORI, L. F. Evaluating Non-Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method with Concentric and Eccentric Holes. Part II: Application of the Influence Functions to the Inverse Problem. **Strain**, v. 46, n. 4, p. 337–346, 2010 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00684.x>

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; MORI, L. F. Evaluating Non-Uniform Residual Stress by the Hole-Drilling Method with Concentric and Eccentric Holes. Part I: Definition and Validation of the Influence Functions. **Strain**, v. 46, n. 4, p. 324–336, 2010 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00684.x>

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; SANTUS, C. A Procedure for Evaluating High Residual Stresses Using the Blind Hole Drilling Method, Including the Effect of Plasticity. **Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 45, n. 4, p. 301–318, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1243/03093247JSA579>

BERNTSSON, F.; KOZLOV, V. A.; MPINGANZIMA, L. Iterative Tikhonov regularization for the Cauchy problem for the Helmholtz equation. **Computers and Mathematics with Applications**, v. 73, n. 1, p. 163–172, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2016.11.004>

BERROCAL, L. O. **Elasticidad**. 3. ed. Madrid: McGraw Hill, 1998. *E-book*.

BORESI, A. P.; SCHMIDT, R. J. **Advanced Mechanics of Materials**. 6. ed. São Paulo: John Wiley & Sons, 2003. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:5\(598\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:5(598))

BOUFFIOUX, C.; PESCI, R.; BOMAN, R. Comparison of Residual Stresses on Long Rolled Profiles Measured by X-Ray Diffraction, Ring Core and the Sectioning Methods and Simulated by FE Method. **Thin-Walled Structures**, v. 104, p. 126–134, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.03.017>

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Discovery and Innovation**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005. *E-book*.

BRYNK, T.; ROMELCZYK-BAISHYA, B. Residual stress estimation based on 3D DIC displacement field measurement around drilled holes. **Procedia Structural Integrity**, v. 13, p. 1267–1272, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.259>

BUCCINI, A. Regularizing Preconditioners by Non Stationary Iterated Tikhonov with General Penalty Term. **Applied Numerical Mathematics**, v. 116, p. 64–81, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2016.07.009>

CASELLA, G.; BERGER, R. L. **Statistical Inference**. 2. ed. Florida: Cengage Learning, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10592-5>

CHATHA, S. S.; PAL, A.; SINGH, T. Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 537–545, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.139>

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analysis**. 4. ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2002. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3264300>

CORDIANO, H. V.; SALERNO, V. L. Study of residual Stresses in Linearly Varying Biaxial-Stress Fields. **Experimental Mechanics**, v. 9, n. 1, p. 17–24, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02327873>

DOUGHTY, M. J. Importance of standardizing the number of cells measured for coefficient of variation (COV) estimates of corneal endothelial cell area values as relevant to contact lens wear. **Contact Lens and Anterior Eye**, n. May, p. 0–1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clae.2020.05.005>

ELEFTHERIOU, M. A change-point model for monitoring the coefficient of variation based on squared ranks test. **Computers and Industrial Engineering**, v. 136, n. December 2018, p. 366–372, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.043>

FAGHIDIAN, S. A. A smoothed inverse eigenstrain method for reconstruction of the regularized residual fields. **International Journal of Solids and Structures**, v. 51, n. 25–26, p. 4427–4434, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.09.012>

FISH, J.; BELYTSCJKO, T. **First Course in Finite Elements**. 1. ed. Chichester: JohnWiley & Sons, Ltd, 2007. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470510858>

GADALLAH, R.; TSUTSUMI, S.; HIRAOKA, K. Prediction of Residual Stresses Induced by Low Transformation Temperature Weld Wires and its Validation Using the Contour Method. **Marine Structures**, v. 44, p. 232–253, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2015.10.002>

GARCIA-GRANADA, A. A.; LACARAC, V. D.; SMITH, D. J. A New Procedure Based on Sachs Boring for Measuring Non-Axisymmetric Residual Stresses: Experimental Application. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 43, n. 12, p. 2753–2768, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00071-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00071-6)

GARZA, C.; DAS, R.; SHTERENLIKHT, A. Measurement of assembly stress in composite structures using the deep-hole drilling technique. **Composite Structures**, v. 202, n. December, p. 119–126, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.031>

GHASEMI, A. R.; MOHAMMADI, M. M. Residual Stress Measurement of Fiber Metal Laminates Using Incremental Hole-Drilling Technique in Consideration of the Integral Method. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 114, p. 246–256, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.05.025>

GIRI, A.; MAHAPATRA, M. M. On the Measurement of Sub-Surface Residual Stresses in SS 304L Welds by Dry Ring Core Technique. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 106, p. 152–160, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.043>

GÓMEZ-PARRA, A.; ÁLVAREZ-ALCÓN, M.; SALGUERO, J. Analysis of the evolution of the Built-Up Edge and Built-Up Layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminium alloys. **Wear**, v. 302, n. 1–2, p. 1209–1218, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.001>

HAGARA, M.; TREBUÑA, F.; PÁSTOR, M. Analysis of the aspects of residual stresses quantification performed by 3D DIC combined with standardized hole-drilling method. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 137, p. 238–256, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.028>

HALLAK, R.; PEREIRA, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de são paulo com o modelo arps: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.

HE, D.; PAN, K. An order optimal regularization method for the Cauchy problem of a Laplace equation in an annulus domain. **Applied Mathematical Modelling**, v. 39, n. 10–11, p. 3063–3074, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.11.027>

HEMMESI, K.; FARAJIAN, M.; BOIN, M. Numerical Studies of Welding Residual Stresses in Tubular Joints and Experimental Validations by Means of X-Ray and Neutron Diffraction Analysis. **Materials & Design**, v. 126, p. 339–350, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.088>

HOLMBERG, J.; STEUWER, A.; STORMVINTER, A. Residual Stress State in an Induction Hardened Steel Bar Determined by Synchrotron and Neutron Diffraction Compared to Results from Lab-XRD. **Materials Science and Engineering A**, v. 667, p. 199–207, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.075>

HOSSEINI, S. M.; AKBARI, S.; SHOKRIEH, M. M. Residual stress measurement through the thickness of ball grid array microelectronics packages using incremental hole drilling. **Microelectronics Reliability**, v. 102, n. June, p. 113473, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.113473>

HUANG, F.; LIU, J.; DENG, Z. Effect of microstructure and inclusions on hydrogen induced cracking susceptibility and hydrogen trapping efficiency of X120 pipeline steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 26, p. 6997–7001, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.07.022>

JAMES, M. N.; NEWBY, M.; DOUBELL, P. Weld Residual Stresses Near the Bimetallic Interface in Clad RPV Steel: A Comparison Between Deep-Hole Drilling and Neutron Diffraction Data. **Nuclear Engineering and Design**, v. 274, p. 56–65, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.03.042>

JONES, K. W.; BUSH, R. W. Investigation of Residual Stress Relaxation in Cold Expanded Holes by the Slitting Method. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 179, p. 213–224, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.004>

KAHROBAEE, S.; HEJAZI, T. H. A RSM-based predictive model to characterize heat treating parameters of D2 steel using combined Barkhausen noise and hysteresis loop methods. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 433, p. 131–140, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.03.015>

KREYSZIG, E. **Matemática Superior para Engenharia**. 9. ed. Davers: John Wiley & Sons, 2009. *E-book*.

LAI, W. M.; RUBIN, D.; KREMPL, E. **Introduction to Continuum Mechanics**. 4. ed. Burlington: Elsevier, 2010. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8560-3.00003-7>

LEE, H. T.; LIU, C. Optimizing the EDM hole-drilling strain gage method for the measurement of residual stress. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 15–16, p. 5626–5635, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.028>

LIN, B.; HE, K.; SHAN, D. Research on Measurement of Residual Stresses of Hemispherical Lithium Hydride by Blind-Hole Method. **Fusion Engineering and Design**, v. 89, n. 4, p. 365–369, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2014.03.016>

LIN, J.; MA, N.; LEI, Y. Measurement of Residual Stress in Arc Welded Lap Joints by  $\cos\alpha$  X-Ray Diffraction Method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 243, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.021>

LOTHHAMMER, L. R.; VIOTTI, M. R.; ALBERTAZZI, A. Residual Stress Measurements in Steel Pipes using DSPI and the Hole-Drilling Technique. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 152, p. 46–55, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.05.008>

MAHMOUDI, A. H.; TRUMAN, C. E.; SMITH, D. J.; PAVIER, M. J. The effect of plasticity on the ability of the deep hole drilling technique to measure axisymmetric residual stress. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 53, n. 11, p. 978–988, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.08.002>

MAINJOT, A. K.; SCHAJER, G. S.; VANHEUSDEN, A. J.; SADOUN, M. J. Residual Stress Measurement in Veneering Ceramic by Hole-Drilling. **Dental Materials**, v. 27, n. 5, p. 439–444, 2011 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2010.12.002>

MAINJOT, A. K.; SCHAJER, G. S.; VANHEUSDEN, A. J.; SADOUN, M. J. Influence of Cooling Rate on Residual Stress Profile in Veneering Ceramic: Measurement by Hole-Drilling. **Dental Materials**, v. 27, n. 9, p. 906–914, 2011 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2011.05.005>

MAINJOT, A. K.; SCHAJER, G. S.; VANHEUSDEN, A. J.; SADOUN, M. J. Influence of Veneer Thickness on Residual Stress Profile in Veneering Ceramic: Measurement by Hole-Drilling. **Dental Materials**, v. 28, n. 2, p. 160–167, 2012 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2011.11.008>

MAINJOT, A. K.; SCHAJER, G. S.; VANHEUSDEN, A. J.; SADOUN, M. J. Influence of Zirconia Framework Thickness on Residual Stress Profile in Veneering Ceramic: Measurement by Hole-Drilling. **Dental Materials**, v. 28, n. 4, p. 378–384, 2012 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.DENTAL.2011.11.009>

MATHAR, J. Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes. **Transactions ASME**, v. 56, n. 4, p. 249–254, 1934.

MEYER, K.; DENKENA, B.; BREIDENSTEIN, B.; ABRÃO, A. M. Influence of residual stress depth distribution on lifecycle behaviour of AISI 4140. **Procedia CIRP**, v. 87, p. 450–455, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.064>

MEYER, P. L. **Probabilidade Aplicações à Estatística**. 2. ed. Pullman: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1965. *E-book*.

MININ, S. I.; TROFIMOV, A. I.; TROFIMOV, M. A. Automated Ultrasonic System Residual Stresses in the Welded Joints of the Circulation Pipe NPP. **Nuclear Energy and Technology**, v. 2, n. 4, p. 236–239, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.11.002>

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. *E-book*.

MOOD, A. M.; GRAYBILL, F. A.; BOES, D. C. **Introduction to the Theory of Statistics**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1974. *E-book*.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 5. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2004. *E-book*.

MOTT, R. L. **Machine Elements in Mechanical Design**. 4. ed. New Jersey: Pearson, 2004. *E-book*.

MOUSSAOUI, K.; SEGONDS, S.; RUBIO, W.; MOUSSEIGNE, M. Studying the Measurement by X-Ray Diffraction of Residual Stresses in Ti6Al4V Titanium Alloy. **Materials Science and Engineering A**, v. 667, p. 340–348, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.130>

MURÁNSKY, O.; HAMELIN, C. J.; HOSSEINZADEH, F.; PRIME, M. B. Evaluation of a Self-Equilibrium Cutting Strategy for the Contour Method of Residual Stress Measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 2016a Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.04.002>

MURÁNSKY, O.; HOSSEINZADEH, F.; HAMELIN, C. J.; TRAORE, Y.; BENDEICH, P. J. Investigating Optimal Cutting Configurations for the Contour Method of Weld Residual Stress Measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 2016b Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.04.006>

NORTON, R. L. **Projetos de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. *E-book*.

MURÁNSKY, O.; HOSSEINZADEH, F.; HAMELIN, C. J.; TRAORE, Y.; BENDEICH, P. J. Residual Stress Analysis in Laser Welded NiTi Sheets using Synchrotron X-Ray Diffraction. **Materials & Design**, v. 100, p. 180–187, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.137>

OWEN, P. D. Limitations of the relative standard deviation of win percentages for measuring competitive balance in sports leagues. **Economics Letters**, v. 109, n. 1, p. 38–41, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2010.07.012>

PAIVA, V. E. L. Simulação de tensões residuais de soldagem e seu alívio por teste hidrostático. 275f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Centro Técnico Científico, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2015.

PANAGOPOULOS, C. N.; GEORGIU, E. P. Surface mechanical behaviour of composite Ni-P-fly ash/zincate coated aluminium alloy. **Applied Surface Science**, v. 255, n. 13–14, p. 6499–6503, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.02.026>

PANDEY, A. K. Computer aided Genetic algorithm based optimization of electrical discharge drilling in titanium alloy (Grade-5) sheet. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 4869–4881, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.478>

PANDEY, C.; MAHAPATRA, M. M.; KUMAR, P. A comparative study of transverse shrinkage stresses and residual stresses in P91 welded pipe including plasticity error. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 18, n. 3, p. 1000–1011, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.02.007>

PERAL, D.; VICENTE, J.; PORRO, J. A.; OCAÑA, J. L. Uncertainty Analysis for Non-Uniform Residual Stresses Determined by the Hole Drilling Strain Gauge Method. **Measurement**, v. 97, p. 51–63, 2017 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2016.11.010>

PERAL, D.; CORREA, C.; DIAZ, M.; PORRO, J. A.; VICENTE, J.; OCAÑA, J. L. Measured Strains Correction for Eccentric Holes in the Determination of Non-Uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gauge Method. **Materials & Design**, v. 132, p. 302–313, 2017 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.06.051>

PISAREV, V.; ODINTSEV, I.; ELEONSKY, S.; APALKOV, A. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 110, n. July, p. 437–456, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.06.022>

PUYMBROECK, E. V.; NAGY, W.; FANG, H.; BACKER, H. Determination of residual weld stresses with the incremental hole-drilling method in tubular steel bridge joints. **Procedia Engineering**, v. 213, p. 651–661, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.061>

QIN, Q.; ZHAO, H.; LI, J.; ZHANG, Y.; SU, X. Microstructure and mechanical properties of friction stir processed Al–Mg<sub>2</sub>Si alloys. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, v. 30, n. 9, p. 2355–2368, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65384-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65384-5)

REDDY, J. N. **An Introduction to the Finite Element Method**. 3. ed.: McGraw-Hill Higher Education, 2006. *E-book*.

RENDLER, N. J.; VIGNESS, I. Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses. **Experimental Mechanics**, v. 6, n. 12, p. 577–586, 1966. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02326825>

RICKERT, T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling. **Procedia CIRP**, v. 45, p. 203–206, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.256>  
ROSSINI, N. S. *et al.* Methods of Measuring Residual Stresses in Components. **Materials and Design**, v. 35, p. 572–588, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.022>

SADD, M. H. **Elasticity: Theory, Applications, and Numerics**. 3. ed. Waltham: Elsevier, 2014. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408136-9.01001-1>

SCHAJER, G. S. Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 103, n. 2, p. 157–163, 1981. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3224988>

SCHAJER, G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I - Stress Calculation Procedures. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 110, n. October 1988, p. 338–343, 1988 a.

SCHAJER, G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part II - Practical Application of the Integral Method. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 110, n. October 1988, p. 344–349, 1988 b.

SCHAJER, G. S. Strain Data Averaging for the Hole-Drilling Method. **Experimental Techniques**, v. 15, p. 25–28, 1991.

SCHAJER, G. S. Hole-Drilling Residual Stress Profiling With Automated Smoothing. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 129, n. 3, p. 440–445, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2744416>

SCHAJER, G. S.; PRIME, M. B. Use of Inverse Solutions for Residual Stress Measurements. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 128, n. 3, p. 375–382, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2204952>

SCHAJER, G. S.; TOOTOONIAN, M. A New Rosette Design for More Reliable Hole-Drilling Residual Stress Measurements. **Experimental Mechanics**, v. 37, n. 3, p. 299–306, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02317422>

SEIFI, R.; SALIMI-MAJD, D. Effects of plasticity on residual stresses measurement by hole drilling method. **Mechanics of Materials**, v. 53, p. 72–79, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2012.05.009>

SEO, S. *et al.* Neutron Diffraction Residual Stress Analysis During Fatigue Crack Growth Retardation of Stainless Steel. **International Journal of Fatigue**, v. 104, p. 408–415, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.08.007>

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality. **Oxford Journals**, v. 52, p. 591–611, 1965.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

SHOKRIEH, M. M.; JALILI, S. M.; KAMANGAR, M. A. An eigen-strain approach on the estimation of non-uniform residual stress distribution using incremental hole-drilling and slitting techniques. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 148, p. 383–392, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.08.035>

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. **Introduction to Genetic Algorithms**. 1. ed. New York: Springer, 2008. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73190-0>

SKOURAS, A. *et al.* Residual Stress Measurements in a Ferritic Steel/In625 Superalloy Dissimilar Metal Weldment using Neutron Diffraction and Deep-Hole Drilling. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 101, p. 143–153, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2012.11.002>

STEGEMANN, R. *et al.* Residual Stress Characterization of Steel TIG Welds by Neutron Diffraction and by Residual Magnetic Stray Field Mappings. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 426, p. 580–587, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.102>

SUN, M. *et al.* Stress corrosion cracking of ultrahigh strength martensite steel Cr 9Ni5MoCo14 in 3.5% NaCl solution. **Aerospace Science and Technology**, v. 36, p. 125–131, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2014.03.004>

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Theory of Elasticity**. 3. ed. Lisbon: Editora Guanabara dois, 1980. *E-book*.

VALIORGUE, F. *et al.* Influence of residual stress profile and surface microstructure on fatigue life of a 15-5PH. **Procedia Engineering**, v. 213, p. 623–629, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.058>

VANGI, D.; TELLINI, S. Hole-drilling strain-gauge method: Residual stress measurement with plasticity effects. **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 132, n. 1, p. 0110031–0110037, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3184030>

WAN, Y. *et al.* Weld Residual Stresses in a Thick Plate Considering Back Chipping: Neutron Diffraction, Contour Method and Finite Element Simulation Study. **Materials Science and Engineering A**, v. 699, p. 62–70, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.079>

WANG, C. *et al.* Surface Mechanical Property and Residual Stress of Peened Nickel-Aluminum Bronze Determined by In-Situ X-ray Diffraction. **Applied Surface Science**, v. 420, p. 28–33, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.108>

WINKLER, R. *et al.* Characterization of thermally sprayed copper and numerically supported residual stress determination by the incremental hole-drilling method. **Surface and Coatings Technology**, v. 371, n. November, p. 255–261, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.018>

XU, Y.; BAO, R. Residual Stress Determination in Friction Stir Butt Welded Joints using a Digital Image Correlation-Aided Slitting Technique. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30, n. 3, p. 1258–1269, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.11.003>

YUKSEL, O. *et al.* Investigation of transverse residual stresses in a thick pultruded composite using digital image correlation with hole drilling. **Composite Structures**, v. 223, n. April, p. 110954, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110954>

ZHAN, Y. *et al.* Experiment and Numerical Simulation for Laser Ultrasonic Measurement of Residual Stress. **Ultrasonics**, v. 73, p. 271–276, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2016.08.013>

ZHANG, Z. *et al.* Distribution of residual stress in an asymmetric T-section beam by stretch-bending. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 164, n. September, p. 105184, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105184>

ZHENG, G. *et al.* An Optimisation Study of the Modified Deep-Hole Drilling Technique using Finite Element Analyses Applied to a Stainless Steel Ring Welded Circular Disc. **International Journal of Solids and Structures**, v. 118–119, p. 1339–1351, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.04.008>

ZHU, M. *et al.* A New Designed Dual-Guided Ring-Core Fiber for OAM Mode Transmission. **Optical Fiber Technology**, v. 25, p. 58–63, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.07.016>

ZILL, D. G.; CULLEN, M. R. **Matemática Avançada para Engenharia**. 3. ed. Sudbury: Jones and Bartlett, 2009. *E-book*.

ZINI, E. O. C. Algoritmo Genético Especializado na Resolução de Problemas com Variáveis Contínuas e Altamente Restritos. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, UNESP, Ilha Solteira, 2009.

## APÊNDICE A – PROCEDIMENTO MATEMÁTICO PARA O CÁLCULO DA TENSÃO RESIDUAL APLICANDO O MÉTODO DO FURO CEGO

As TR são analisadas a partir das deformações relaxadas usando relações matemáticas baseadas na Teoria da Elasticidade Linear (TEL), considerando um estado plano de tensões para um material linear, elástico e isotrópico (LAI; RUBIN; KREMPPL, 2010; SADD, 2014). Com o propósito de calcular as TR, uma roseta, composta por três extensômetros, é instalada na superfície de um componente onde são medidas as deformações relaxadas à medida que são executados os furos em seu centro. Segundo a norma ASTM E837-13 (2013), considerando TR não-uniformes, a equação que vincula as TR presentes com as deformações relaxadas medidas na superfície, denotadas  $e_j$ , decorrentes do  $j$ -ésimo passo de profundidade, é dada por

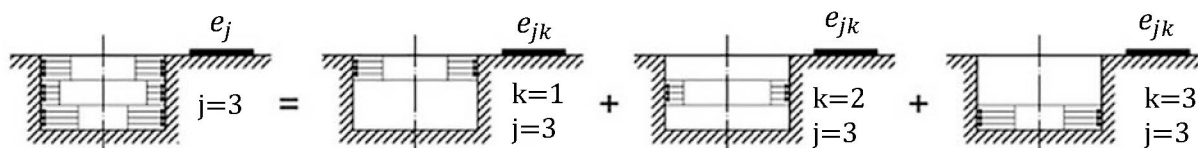
$$e_j = \frac{(1 + \nu)}{E} \sum_{k=1}^j a_{jk} \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)_k + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j b_{jk} \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)_k \cos(2\theta) + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j b_{jk} (\tau_{xy})_k \sin(2\theta) \quad (\text{A.1})$$

onde  $(\sigma_x)_k$  é a tensão normal na direção x para cada passo k,  $(\sigma_y)_k$  é a tensão normal na direção y para cada passo k,  $(\tau_{xy})_k$  é a tensão cisalhante no plano xy para cada passo k, E é o módulo de elasticidade do material,  $\theta$  é o ângulo de orientação de cada extensômetro e  $a_{jk}$  e  $b_{jk}$  são coeficientes que consideram a geometria das rosetas, o diâmetro do furo, as distâncias entre os extensômetros e o furo e, principalmente, a profundidade dos furos (SHAJER, 1988a, 1988b). Os valores numéricos desses coeficientes de calibração são calculados através do MEF com rosetas padronizadas (APÊNDICE C).

Conforme a equação A.1, a deformação  $e_j$  medida pelo extensômetro é composta por uma série de incrementos de deformações  $e_{jk}$ , onde j corresponde ao estágio de perfuração e k o nível de profundidade. Essas deformações  $e_{jk}$  somadas compõem a deformação  $e_j$  devido ao princípio da superposição (FIGURA 83). Nesse caso, como exemplo, a deformação  $e_j$ , quando  $j = 3$ , lida no extensômetro,

corresponde ao alívio de deformação devido à execução do terceiro furo, apontando o valor da deformação aliviada no terceiro estágio de profundidade.

FIGURA 83 - DECOMPOSIÇÃO DAS DEFORMAÇÕES MEDIDAS EM  $J = 3$ .



FONTE: Adaptado de Peral et al. (2017b).

## APÊNDICE B – IMPLEMENTAÇÃO MATEMÁTICA DAS TENSÕES RESIDUAIS NÃO-UNIFORMES

As TR podem ser calculadas encontrando, inicialmente, as deformações equiaxiais ( $p_j$ ), as deformações devido à diferença entre as deformações longitudinais ( $q_j$ ) e as deformações cisalhantes em xy ( $t_j$ ) (PERAL *et al.*, 2017a, 2017b; SCHAJER, 2007). As deformações medidas em cada passo j pelos extensômetros em três direções correspondem às deformações  $(e_1)_j$ ,  $(e_2)_j$  e  $(e_3)_j$ , as quais podem ser combinadas às variáveis  $p_j$ ,  $q_j$  e  $t_j$ , como

$$p_j = \frac{(e_3 + e_1)_j}{2}, \quad (\text{B.1})$$

$$q_j = \frac{(e_3 - e_1)_j}{2} \quad (\text{B.2})$$

e

$$t_j = \frac{(e_3 + e_1 - 2e_2)_j}{2}, \quad (\text{B.3})$$

onde o índice j se refere aos passos de profundidade ao longo do furo correspondentes às deformações medidas. Com as deformações  $p_j$ ,  $q_j$  e  $t_j$  obtidas, pode-se encontrar a tensão biaxial isotrópica ( $P_k$ ), a tensão devido à diferença entre as tensões normais ( $Q_k$ ) e a tensão cisalhante em xy ( $T_k$ ) para cada passo k, resolvendo as equações

$$\sum_{k=1}^j a_{jk} \cdot P_k = \frac{E}{1 + \nu} \cdot p_j, \quad (\text{B.4})$$

$$\sum_{k=1}^j b_{jk} \cdot Q_k = E \cdot q_j \quad (\text{B.5})$$

e

$$\sum_{k=1}^j b_{jk} \cdot T_k = E \cdot t_j. \quad (\text{B.6})$$

As tensões  $(\sigma_x)_k$ ,  $(\sigma_y)_k$  e  $(\tau_{xy})_k$ , que correspondem às tensões normais nas direções dos eixos x e y e a tensão cisalhante no plano definido por esses eixos, respectivamente, podem ser combinadas com as variáveis  $P_k$ ,  $Q_k$  e  $T_k$ , utilizando as equações

$$(\sigma_x)_k = P_k - Q_k, \quad (\text{B.7})$$

$$(\sigma_y)_k = P_k + Q_k \quad (\text{B.8})$$

e

$$(\tau_{xy})_k = T_k. \quad (\text{B.9})$$

Com as tensões encontradas, é possível computar as tensões e as direções principais calculando os autovalores e autovetores através da aplicação da equação

$$(\sigma_{min})_k, (\sigma_{max})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \quad (\text{B.10})$$

e

$$\beta_k = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{-T_k}{-Q_k} \right). \quad (\text{B.11})$$

## APÊNDICE C – MÉTODO DE REGULARIZAÇÃO DE TIKHONOV

Métodos de regularização podem ser empregadas em diversas aplicações de engenharia como identificação de forças de excitação mecânica, reconstrução de forças em uma estrutura, restauração de imagens, solução de problemas de condução de calor e de condução de fluido, atualização de modelos para detecção de danos, problemas de otimização etc. O método de regularização de Tikhonov é um dos mais populares por ser bastante utilizado na regularização de dados experimentais como, por exemplo, valores de forças aferidos por uma célula de carga durante um experimento físico. Resultados experimentais podem ser mal condicionados e sua regularização pode ser necessária para alcançar soluções precisas. O método pode ser usado para controlar a estabilidade da solução numérica em relação aos erros de medição nos dados. Dependendo da aplicação, podem levar a uma melhoria na qualidade das aproximações calculadas (AUCEJO; DE SMET, 2018; BUCCINI, 2017).

Inicialmente, na implementação do método de regularização de Tikhonov, é preciso estimar os erros-padrão nas deformações combinadas  $p_j$ ,  $q_j$  e  $t_j$ . Para cada variável, essas medidas de erros padrão (desvios padrão) são dadas por (AUCEJO; DE SMET, 2018; BUCCINI, 2017)

$$p_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(p_j - 3p_{j+1} + 3p_{j+2} - p_{j+3})^2}{20(n-3)}, \quad (C.1)$$

$$q_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(q_j - 3q_{j+1} + 3q_{j+2} - q_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad (C.2)$$

e

$$t_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(t_j - 3t_{j+1} + 3t_{j+2} - t_{j+3})^2}{20(n-3)}, \quad (C.3)$$

onde  $p_{std}$  é o desvio padrão referente à variável  $p$ ,  $q_{std}$  é o desvio padrão referente à variável  $q$ ,  $t_{std}$  é o desvio padrão referente à variável  $t$  e  $n$  é o número de passos de profundidade de furo, sendo que o somatório é realizado ao longo de toda a extensão. Considerando uma grande quantidade de perfurações incrementais (20 incrementos),

erros pequenos nas deformações medidas podem causar proporcionalmente erros maiores nas tensões calculadas (AUCEJO; DE SMET, 2018; BUCCINI, 2017). As equações que relacionam a tensão com a deformação são modificadas aplicando

$$(a_{kj}a_{jk} + \alpha_P c_{kj}c_{jk})P_k = \frac{E}{1 + \nu} a_{kj}p_j, \quad (C.4)$$

$$(b_{kj}b_{jk} + \alpha_Q c_{kj}c_{jk})Q_k = E b_{kj}q_j \quad (C.5)$$

e

$$(b_{kj}b_{jk} + \alpha_T c_{kj}c_{jk})T_k = E b_{kj}t_j. \quad (C.6)$$

onde  $a_{jk}$  e  $b_{jk}$  são os  $jk$ -ésimos coeficientes de calibração e  $c_{jk}$  é o  $jk$ -ésimo coeficiente da matriz triangular e  $\alpha_P$ ,  $\alpha_Q$  e  $\alpha_T$  são os fatores que controlam a intensidade da regularização aplicada. Nesse caso, a regularização tem o efeito de suavizar os resultados da variável de saída (tensões). Por causa da regularização aplicada, as deformações não regularizadas, que estão vinculadas às tensões calculadas  $P_k$ ,  $Q_k$  e  $T_k$ , não correspondem exatamente às deformações  $p_j$ ,  $q_j$  e  $t_j$ . Os vetores *misfit* indicam as diferenças nesses valores de deformações e são dadas por (AUCEJO; DE SMET, 2018; BUCCINI, 2017)

$$p_{misfit_j} = p_j - \frac{1 + \nu}{E} a_{jk} \cdot P_k, \quad (C.7)$$

$$q_{misfit_j} = q_j - \frac{1}{E} b_{jk} \cdot Q_k \quad (C.8)$$

e

$$t_{misfit_j} = t_j - \frac{1}{E} b_{jk} \cdot T_k. \quad (C.9)$$

onde  $p_{misfit}$  é o desajuste (diferença) da variável  $p$ ,  $q_{misfit}$  é o desajuste (diferença) da variável  $q$  e  $t_{misfit}$  é o desajuste (diferença) da variável  $t$ . Para calcular os quadrados médios dos vetores *misfit*, aplicam-se as relações (AUCEJO; DE SMET, 2018; BUCCINI, 2017)

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_{misfit_j})^2, \quad (C.10)$$

$$q_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (q_{misfit_j})^2 \quad (C.11)$$

e

$$t_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_{misfit_j})^2. \quad (C.12)$$

onde  $p_{rms}$  é o valor do quadrado médio de  $p_{misfit}$ ,  $q_{rms}$  é o valor do quadrado médio de  $q_{misfit}$  e  $t_{rms}$  é o valor do quadrado médio de  $t_{misfit}$ . Para estimar novas suposições dos fatores de regularização, são aplicadas as relações (AUCEJO; DE SMET, 2018; BUCCINI, 2017)

$$(\alpha_P)_{new} = \frac{p_{std}^2}{p_{rms}^2} (\alpha_P)_{old}, \quad (C.12)$$

$$(\alpha_Q)_{new} = \frac{q_{std}^2}{q_{rms}^2} (\alpha_Q)_{old} \quad (C.13)$$

e

$$(\alpha_T)_{new} = \frac{t_{std}^2}{t_{rms}^2} (\alpha_T)_{old}. \quad (C.14)$$

Os valores  $\alpha_P$ ,  $\alpha_Q$  e  $\alpha_T$  obtidos nas equações C.12, C.13 e C.14, respectivamente, são utilizados introduzidos nas equações C.4, C.5 e C.6 e recalculados. Esse processo iterativo é repetido inúmeras vezes até que a diferença relativa entre os valores da suposição atual ( $p_{std}$ ,  $q_{std}$  e  $t_{std}$ ) e os valores da nova suposição ( $p_{rms}$ ,  $q_{rms}$  e  $t_{rms}$ ) sejam menores que %5.

## APÊNDICE D – MÉTODO PARA CORREÇÃO DA PLASTICIDADE

Quando o método do furo cego é usado para avaliar as tensões residuais em um componente, tensões próximas ao escoamento do material podem ser geradas na região do furo devido à concentração de tensão. Se o nível de tensão residual for comparável à tensão de escoamento do material, a concentração de tensão devido ao processo de perfuração pode produzir regiões nas quais o limite elástico do material é ultrapassado. Como o método do furo cego se baseia na consideração de um regime linear e elástico, a presença de tensões plásticas pode causar um erro significativo (BEGHINI; BERTINI; SANTUS, 2010; PANDEY, 2019). Assim, um procedimento que leva em consideração os efeitos da plasticidade localizada induzida, devido à introdução do furo, é desenvolvido para que haja a correção do efeito da plasticidade local produzida durante o processo de perfuração (BEGHINI; BERTINI; SANTUS, 2010; PANDEY; MAHAPATRA; KUMAR, 2018).

Visando corrigir uma eventual ocorrência desse fenômeno, é necessário obter as tensões equivalentes de von Mises

$$\sigma_{eq,e} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad (D.1)$$

as quais são consideradas para quantificar o efeito da biaxialidade. Dessa forma, um fator de plasticidade adimensional é introduzido,

$$f_e = \frac{\sigma_{eq,e} - \sigma_{eq}}{\sigma_Y - \sigma_{eq}}, \quad (D.2)$$

onde  $\sigma_{eq}$  é a tensão residual equivalente que produz o início da plasticidade e  $\sigma_Y$  é a tensão de escoamento do material. O fator de plasticidade ( $f_e$ ) mede a intensidade da tensão residual em relação ao início aproximado do processo de plastificação fornecido pela solução analítica de Kirsch (BEGHINI; BERTINI; MORI, 2009; PANDEY; MAHAPATRA; KUMAR, 2018), considerando um estado plano de tensões. A tensão residual equivalente no início da plastificação pode ser expressa em função da razão de biaxialidade  $\sigma_x/\sigma_y$  e de acordo com a solução de Kirsch (BEGHINI;

BERTINI; SANTUS, 2010; PANDEY; MAHAPATRA; KUMAR, 2018), considerando um estado plano de tensões, como

$$\sigma_{eq} = \sigma_Y \frac{\sqrt{1 - \sigma_y/\sigma_x + \sigma_y/\sigma_x^2}}{3 - \sigma_y/\sigma_x}. \quad (D.3)$$

Nas equações anteriores,  $f_e = 0$  representa a condição de maior tensão residual que ainda não produz plasticidade, enquanto  $f_e = 1$  está relacionado à tensão residual que produz um escoamento integral. Quando uma plastificação significativa é produzida, o fator de plasticidade calculado  $f_e$  é maior que o fator de plasticidade real  $f$ . Como não é esperado que a plasticidade desempenhe um papel significativo para um fator de plasticidade próximo de 0, considera-se que  $f_e$  seja aproximadamente igual a  $f$ , quando  $f$  for muito menor que 1. A seguinte função

$$f_e = f + W \cdot f^u \quad (D.4)$$

aproxima com precisão a relação entre  $f$  e  $f_e$  para qualquer configuração considerada, onde  $W$  e  $u$  são parâmetros de aproximação (BEGHINI; BERTINI; SANTUS, 2010; PANDEY; MAHAPATRA; KUMAR, 2018). Esse parâmetros são calculados para quaisquer materiais e quaisquer configurações geométricas por meio de polinômios bivariados em função da relação entre o diâmetro do furo e o diâmetro da roseta ( $D_o/D$ ), da razão entre as tensões normais ( $\sigma_y/\sigma_x$ ) e em função dos coeficientes  $w_i$  e  $m_i$  ( $i = 1, \dots, 12$ ), conforme mostram as seguintes equações (BEGHINI; BERTINI; SANTUS, 2010; PANDEY; MAHAPATRA; KUMAR, 2018)

$$\begin{aligned} W = & w_1 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^3 \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 + w_2 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2 \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 + w_3 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 \\ & + w_4 \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 + w_5 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^3 \left(\frac{D_o}{D}\right) + w_6 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2 \left(\frac{D_o}{D}\right) \\ & + w_7 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) \left(\frac{D_o}{D}\right) + w_8 \left(\frac{D_o}{D}\right) + w_9 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^3 \\ & + w_{10} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2 + w_{11} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) + w_{12} \end{aligned} \quad (D.5)$$

e

$$\begin{aligned}
\mu = & m_1 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^3 \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 + m_2 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2 \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 + m_3 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 \\
& + m_4 \left(\frac{D_o}{D}\right)^2 + m_5 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^3 \left(\frac{D_o}{D}\right) + m_6 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2 \left(\frac{D_o}{D}\right) \\
& + m_7 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) \left(\frac{D_o}{D}\right) + m_8 \left(\frac{D_o}{D}\right) + m_9 \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^3 \\
& + m_{10} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2 + m_{11} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right) + m_{12}.
\end{aligned} \tag{D.6}$$

Os coeficientes  $w_i$  e  $m_i$  são encontrados por um ajuste de mínimos quadrados e dependem da relação entre a profundidade do furo e o diâmetro da roseta ( $Z/D$ ), da razão de endurecimento por deformação ( $E_T/E$ ) e do tipo da roseta (tipo A ou tipo B). Esses coeficientes são usados para calcular os parâmetros  $W$  e  $u$  os quais são utilizados para aproximar o fator de plasticidade calculado  $f_e$  ao fator de plasticidade real  $f$  (BEGHINI; BERTINI; SANTUS, 2010; PANDEY; MAHAPATRA; KUMAR, 2018).

Para resolver numericamente a equação D.4 e obter o fator de plasticidade real  $f$ , supondo que os parâmetros  $W$  e  $\mu$  e o fator de plasticidade elasticamente  $f_e$  sejam conhecidos, o algoritmo de Newton-Raphson é aplicado com a equação (BEGHINI; BERTINI; SANTUS, 2010; PANDEY; MAHAPATRA; KUMAR, 2018)

$$f_{i+1} = f_i - \frac{W \cdot f_i^u + f_i - f_e}{u \cdot W \cdot f_i^{u-1} + 1}. \tag{D.7}$$

Na primeira iteração é utilizado  $f_i = 0$  e calculado  $f_{i+1}$ . Na segunda iteração é encontrado um novo  $f_{i+1}$  com o  $f_i$  encontrado na iteração anterior. Dessa forma, esse processo é repetido diversas vezes até o valor de  $f$  convergir.

## APÊNDICE E – CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE CALIBRAÇÃO

Os coeficientes de calibração; usados no método do furo cego para calcular as tensões residuais; ajustam a geometria das rosetas, o diâmetro do furo, as distâncias entre os extensômetros e o furo e, principalmente, a profundidade dos furos. No procedimento matemático utilizado para encontrar esses coeficientes, são aplicadas tensões unitárias na superfície interna do furo e medidos os deslocamentos nas direções radiais na superfície do componente.

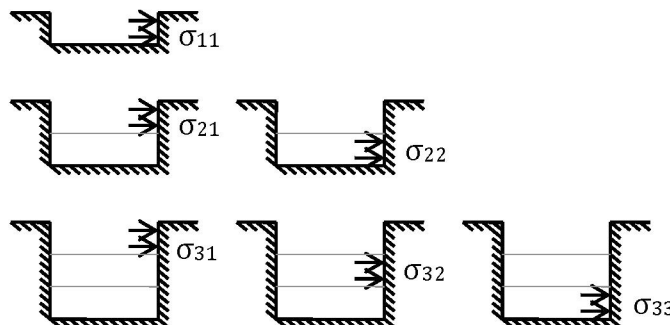
Com o propósito de calcular os coeficientes de calibração  $A_{ij}$ , onde “i” se refere ao i-ésimo estágio de perfuração e “j” ao nível de profundidade (FIGURA 84), considera-se uma peça com um furo situado em seu centro, onde são aplicados carregamentos axissimétricos na superfície interna do mesmo. Pode-se associar as deformações na direção radial  $\varepsilon_{ij}$  sobre a superfície de uma peça com as tensões normais  $\sigma_{x_{ij}}$  e  $\sigma_{y_{ij}}$  na direção x e na direção y, respectivamente, presentes na região do furo, introduzindo os coeficientes de calibração  $A_{ij}$  como (NIKU, 1985)

$$\varepsilon_{ij} = A_{ij} (\sigma_{x_{ij}} + \sigma_{y_{ij}}). \quad (\text{E.1})$$

Considerando um carregamento presente na superfície interna do furo do tipo axissimétrico oriundo de um carregamento biaxial externo, para calcular a deformação na direção radial  $\varepsilon_{ij}$ , a partir da aplicação da tensão radial  $\sigma_{ij}$ , a equação pode ser simplificada como

$$\varepsilon_{ij} = 2 \cdot A_{ij} \sigma_{ij}. \quad (\text{E.2})$$

FIGURA 84 - INTERPRETAÇÃO DA APLICAÇÃO DAS TENSÕES UNITÁRIAS NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA NORMAL.



FONTE: Adaptado de Peral et al. (2017a).

Considerando uma marcação com a mesma geometria de um extensômetro que compõe uma roseta do tipo B, as deformações podem ser calculadas por

$$\varepsilon_{ij} = \frac{U_{ij}^{r_2} - U_{ij}^{r_1}}{r_2 - r_1}, \quad (\text{E.3})$$

onde  $r_1$  é a distância do centro do furo até a aresta (perpendicular à distância radial) mais próxima da marcação e  $r_2$  é a distância do centro do furo até a aresta (perpendicular à distância radial) mais afastada da marcação,  $U_{ij}^{r_1}$  corresponde aos deslocamentos radiais médios da aresta mais próxima e  $U_{ij}^{r_2}$  corresponde aos deslocamentos radiais médios da aresta mais afastada (NIKU, 1985). O deslocamento na direção radial na superfície pode ser encontrado quando uma tensão unitária  $\sigma_{ij}$  é aplicada na face lateral interna em cada camada de perfuração (FIGURA 84). Sabendo que o deslocamento calculado pode ser relacionado aos coeficientes  $A_{ij}$ , as duas equações anteriores podem ser igualadas na forma

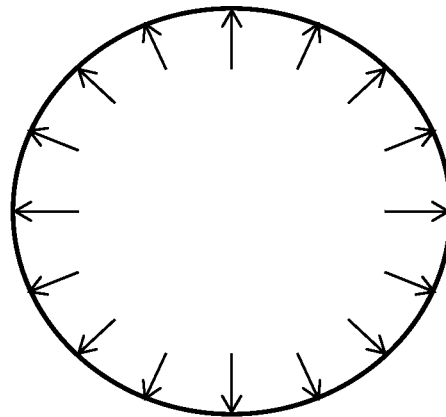
$$\frac{U_{ij}^{r_2} - U_{ij}^{r_1}}{r_2 - r_1} = 2 \cdot A_{ij} \sigma_{ij}, \quad (\text{E.4})$$

Considerando uma roseta com extensômetros de raios  $r_1$  e  $r_2$ , a equação pode ser manipulada isolando a variável  $A_{ij}$ , chegando à equação

$$A_{ij} = \frac{U_{ij}^{r_2} - U_{ij}^{r_1}}{2(r_2 - r_1) \cdot \sigma_{ij}}. \quad (\text{E.5})$$

Com a aplicação das tensões unitárias em cada camada, podem-se determinar os deslocamentos radiais nas posições  $r_1$  e  $r_2$  e, com isso, calcular os coeficientes. O índice  $i$  corresponde ao incremento de perfuração e o índice  $j$  corresponde a cada nível de profundidade onde é aplicada a tensão unitária, conforme mostra a vista longitudinal (FIGURA 84). As tensões biaxiais, denominadas tensões normais de compressão, são aplicadas em cada camada para encontrar os coeficientes  $A_{ij}$  que compõe a matriz de calibração, como mostra a FIGURA 85 em uma vista transversa (NIKU, 1985).

FIGURA 85 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NORMAL NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA TRANSVERSAL.



FONTE: O autor (2020).

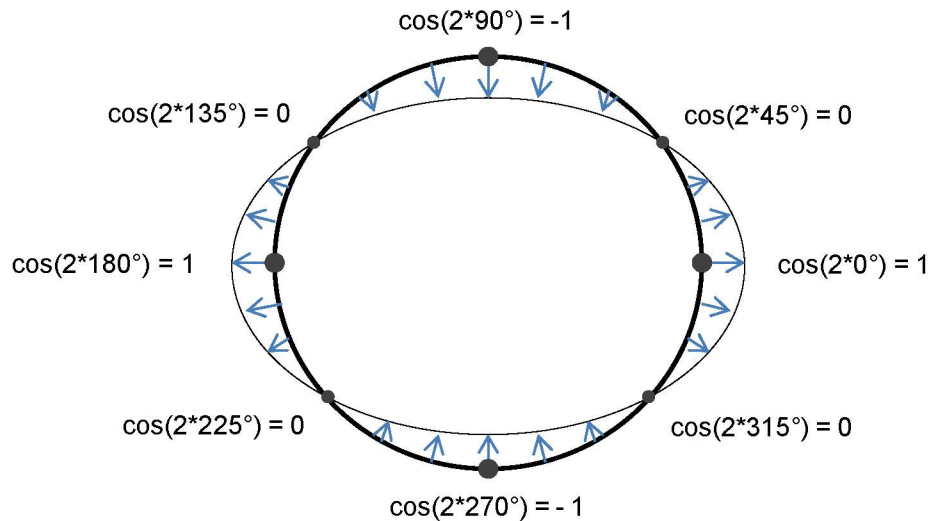
Os coeficientes  $B_{ij}$  podem ser calculados aplicando um procedimento semelhante àquele usado para a determinação dos coeficientes  $A_{ij}$ , onde “i” se refere ao i-ésimo estágio de perfuração e “j” ao nível de profundidade (FIGURA 84). Os coeficientes  $B_{ij}$  possuem uma interpretação física similar às anteriores, porém considerando as tensões cisalhantes. Nesse caso, o carregamento em torno de uma camada não é axissimétrico. Ao invés de uma pressão unitária  $\sigma_{ij} = 1$ , uma tensão normal igual a  $1.\cos(2\theta)$  e uma tensão cisalhante igual a  $-1.\sen(2\theta)$  são aplicadas simultaneamente em cada estágio. Desta forma, as tensões aplicadas variam de acordo com a posição circunferencial dentro da face interna do furo dependendo do ângulo analisado (NIKU, 1985).

A tensão normal é aplicada na superfície interna do furo, conforme ilustra a FIGURA 86, onde há um valor máximo quando  $\theta = 0^\circ = 180^\circ = 360^\circ$ , um valor mínimo quando  $\theta = 90^\circ = 270^\circ$  e um valor nulo quando  $\theta = 45^\circ = 135^\circ = 225^\circ = 315^\circ$ . Simultaneamente, a tensão de cisalhamento é aplicada na superfície interna no furo conforme ilustra a FIGURA 87 onde há um valor máximo quando  $\theta = 135^\circ = 315^\circ$ , um valor mínimo quando  $\theta = 45^\circ = 225^\circ$  e um valor nulo quando  $\theta = 0^\circ = 90^\circ = 180^\circ = 270^\circ = 360^\circ$ . Esse perfil de tensão é aplicado em cada camada para obter o coeficiente referente a cada estágio de perfuração e para cada camada onde são aplicadas as tensões unitárias. Aplicando a equação que considera o emprego das tensões compressivas normais (FIGURA 86) e o emprego das tensões cisalhantes (FIGURA 87), dado por (NIKU, 1985)

$$B_{ij} = \frac{(U_{ij}^{r_2} - U_{ij}^{r_1})|_{\theta=0^\circ} + (U_{ij}^{r_2} - U_{ij}^{r_1})|_{\theta=90^\circ}}{4(r_2 - r_1) \cdot \sigma_{ij}} + \frac{(U_{ij}^{r_2} - U_{ij}^{r_1})|_{\theta=0^\circ} + (U_{ij}^{r_2} - U_{ij}^{r_1})|_{\theta=90^\circ}}{4(r_2 - r_1) \cdot \tau_{ij}}, \quad (\text{E.6})$$

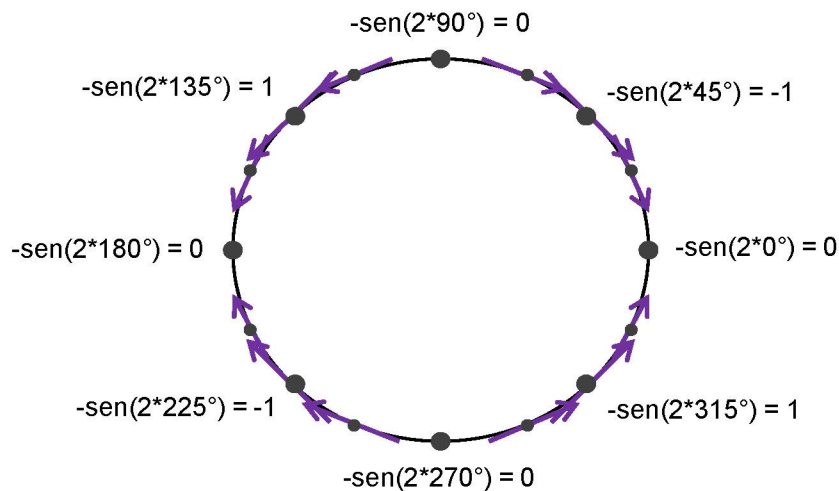
pode-se obter os valores dos coeficientes  $B_{ij}$ , onde “i” se refere ao i-ésimo estágio de perfuração e “j” ao nível de profundidade. Com os deslocamentos medidos na superfície do componente, são encontrados os coeficientes  $B_{ij}$  que compõe a matriz de calibração (NIKU, 1985).

FIGURA 86 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO NORMAL NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA TRANSVERSAL.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 87 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO DE CISALHAMENTO NA SUPERFÍCIE INTERNA DO FURO NUMA VISTA TRANSVERSAL.



FONTE: O autor (2020).

Os dois coeficientes de calibração encontrados,  $A_{ij}$  e  $B_{ij}$ , dependem da geometria dos extensômetros, das propriedades elásticas do material, do raio e da profundidade do furo. Assim, as medições de calibração precisam ser efetuadas para cada tipo de material estudado. Em virtude desses coeficientes serem dependentes do tipo de material, foram introduzidos os coeficientes genéricos  $a_{ij}$  e  $b_{ij}$ , independentes do material. A dependência das propriedades elásticas pode ser eliminada na prática definindo dois coeficientes adimensionais relacionados como (SCHAJER, 1988):

$$a_{ij} = \frac{2EA_{ij}}{1 + \nu} \quad (\text{E.7})$$

e

$$b_{ij} = 2EB_{ij}. \quad (\text{E.8})$$

Esses coeficientes  $a_{ij}$  e  $b_{ij}$  são associados com as tensões biaxiais e com as tensões de cisalhamento, respectivamente. Portanto, os coeficientes de calibração são usados no método do furo cego para calcular as tensões residuais.

## APÊNDICE F – EXPERIMENTO FATORIAL

O planejamento fatorial pode ser utilizado para verificar se os fatores e suas interações são significativos, examinando como os efeitos de cada fator pode ter sobre as respostas medidas. Dependendo do número de fatores analisados, os experimentos fatoriais podem ser classificados como  $2^k$  fatorial. Considerando um experimento fatorial com 2 fatores (fator A e fator B) e com n repetições, a forma de calcular os totais das observações e as médias correspondentes aos fatores, onde o fator A possui a níveis e o fator B possui b níveis, são mostradas pelas equações

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n y_{ijl} \quad \bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{bn} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (\text{F.1})$$

onde  $y_{i..}$  denota o total das observações obtidas no i-ésimo nível do fator A e  $\bar{y}_{i..}$  denota a média correspondente ao fator A (TABELA 21),

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{l=1}^n y_{ijl} \quad \bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{an} \quad j = 1, 2, \dots, b \quad (\text{F.2})$$

onde  $y_{.j.}$  denota o total das observações obtidas no j-ésimo nível do fator B e  $\bar{y}_{.j.}$  denota a média correspondente ao fator B (TABELA 21),

$$y_{ij.} = \sum_{l=1}^n y_{ijl} \quad \bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n} \quad (\text{F.3})$$

onde  $y_{ij.}$  é a resposta observada do i-ésimo nível do fator A e j-ésimo nível do fator B e  $\bar{y}_{ij.}$  denota a média correspondente para n repetições (TABELA 21)

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n y_{ijl} \quad \bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{abn}, \quad (\text{F.4})$$

onde  $y_{...}$  é o total global de todas as observações e  $\bar{y}_{...}$  denota a média correspondente para  $n$  repetições.

O modelo para um experimento fatorial  $2^2$  é computado a partir da soma de quadrados do fator A, do fator B e da interação AB, aplicando as equações

$$SQA = \frac{\sum_{i=1}^a y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}, \quad (F.5)$$

$$SQB = \frac{\sum_{j=1}^b y_{.j.}^2}{an} - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (F.6)$$

e

$$SQAB = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2}{n} - \frac{y_{...}^2}{abn} - SQA - SQB. \quad (F.7)$$

TABELA 21 - ARRANJO DOS DADOS PARA UM PLANEJAMENTO FATORIAL COM 2 FATORES.

		Fator B				Totais	Médias
		1	2	...	b		
Fator A	1	$y_{111}, y_{112}, \dots,$ $y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots,$ $y_{12n}$	...	$y_{1b1}, y_{1b2}, \dots,$ $y_{1bn}$	$y_{1..}$	$\bar{y}_{1..}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots,$ $y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots,$ $y_{22n}$	...	$y_{2b1}, y_{2b2}, \dots,$ $y_{2bn}$	$y_{2..}$	$\bar{y}_{2..}$
	...	...	...	...	...		
	a	$y_{a11}, y_{a12}, \dots,$ $y_{a1n}$	$y_{a21}, y_{a22}, \dots,$ $y_{a2n}$	...	$y_{ab1}, y_{ab2}, \dots,$ $y_{abn}$	$y_{a..}$	$\bar{y}_{a..}$
Totais		$y_{.1.}$	$y_{.2.}$		$y_{.b.}$	$y_{...}$	
Médias		$\bar{y}_{.1.}$	$\bar{y}_{.2.}$		$\bar{y}_{.b.}$		$\bar{y}_{...}$

FONTE: O autor (2020).

Para calcular a soma de quadrados residual (SQR), é preciso calcular a soma de quadrados total (SQT) dado por

$$SQT = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^n y_{ijl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}. \quad (F.8)$$

Com a SQT encontrada, a SQR pode ser obtida por

$$SQR = SQT - (SQA + SQB + SQAB). \quad (F.9)$$

Os quadrados médios QMA, QMB, QMAB, QMR podem ser obtidos dividindo a soma dos quadrados SQA, SQB, SQAB, SQR e SQT pelo número de graus de liberdade. Segundo Montgomery e Runger (2012), os graus de liberdade para um experimento  $2^2$  fatorial são estabelecidos conforme consta no quadro da ANOVA (TABELA 22).

TABELA 22 - QUADRO DA ANÁLISE DA VARIÂNCIA (ANOVA).

Fonte da Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F calculado
Fator A	SQA	a-1	QMA	QMA / QMR
Fator B	SQB	b-1	QMB	QMB / QMR
Interação AB	SQAB	(a-1)(b-1)	QMAB	QMAB / QMR
Resíduo	SQR	ab(n-1)	QMR	
Total	SQT	abn-1		

FONTE: O autor (2020).

No planejamento fatorial, os valores F calculados, considerados uma estatística de teste, são comparados com o valor da distribuição F de Snedecor, com base nos graus de liberdade e no nível de significância. Dependendo dos valores F encontrados, os fatores podem ser classificados como significantes ou insignificantes.

## APÊNDICE G – INTERVALO DE CONFIANÇA

O intervalo aleatório que informa onde provavelmente está contido o verdadeiro valor do parâmetro em estudo é denominado intervalo de confiança e, é corriqueiramente usado para estimar o valor de um parâmetro de interesse. Um intervalo de confiança pode ser delimitado por um valor limite inferior (A) e um limite superior (B) de forma que seja de  $1-\alpha$  a confiança de que este intervalo envolva o verdadeiro valor do parâmetro, onde  $\alpha$  é o nível de significância. A escolha do nível de confiança de  $1-\alpha$  é arbitrária e estipulada pelo pesquisador, sendo que os níveis de confiança mais comuns são de 90%, 95% e 99%. Supondo que um conjunto de amostras é coletado e, para um parâmetro  $\mu$ , um intervalo de confiança 95% é calculado com base nos dados das amostras, então 95% desses intervalos conterão o valor de  $\mu$ . Pode-se determinar o intervalo de confiança quando o desvio padrão da população é conhecido ou quando o desvio padrão da população é estimado a partir do desvio padrão amostral. A probabilidade do intervalo de confiança pode ser representada na forma (MONTGOMERY; RUNGER, 2012)

$$P \{A \leq \mu \leq B\} = 1 - \alpha, \quad (\text{G.1})$$

onde  $1-\alpha$  é o nível de confiança que está entre 0 e 1.

Supondo que uma amostra aleatória com  $n$  elementos tenha uma distribuição normal  $X \sim N(\mu, \sigma^2)$  com uma média populacional  $\mu$  e uma variância conhecida  $\sigma^2$ , pode-se padronizar a variável aleatória  $X$ , sabendo que  $\bar{X}$  é a média amostral, admitindo-se que a variável aleatória  $Z$  tenha uma distribuição normal padrão  $Z \sim N(0,1)$  (MEYER, 1965; MOOD; GRAYBILL, F. A.; BOES, 1974; MORETTIN; BUSSAB, 2004)

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}. \quad (\text{G.2})$$

Com o objetivo de estimar o intervalo de confiança para a média populacional, são calculados os limites inferior e superior com base numa amostra aleatória da população. Para diferentes amostras, pode-se obter diferentes valores desses limites.

Logo, esses intervalos de confiança encontrados são considerados aleatórios (MEYER, 1965; MOOD; GRAYBILL, F. A.; BOES, 1974; MORETTIN; BUSSAB, 2004).

Para calcular os limites do intervalo de confiança é preciso conhecer a média da população e a média da amostra, o desvio padrão da população ou estimá-lo por meio da amostra, o número de elementos da amostra e adotar o nível de confiança  $1-\alpha$ . Com isso, podem-se obter os valores que delimitam o intervalo de confiança para um determinado caso (MEYER, 1965; MOOD; GRAYBILL, F. A.; BOES, 1974; MORETTIN; BUSSAB, 2004).

Selecionando uma amostra e realizando as devidas análises, o intervalo para a média absoluta pode ser representado na forma

$$a \leq \mu \leq b, \quad (\text{G.3})$$

sendo  $a$  e  $b$  considerados os limites inferior e superior de  $1-\alpha$  de confiança, respectivamente. Dado que  $Z \sim N(0,1)$  tem uma distribuição normal padrão, pode-se escrever

$$P\left\{-z_{\alpha/2} \leq \frac{(\bar{X} - \mu)}{(\sigma/\sqrt{n})} \leq z_{\alpha/2}\right\} = 1 - \alpha. \quad (\text{G.4})$$

onde  $z_{\alpha/2}$  é o ponto superior com  $100*(\alpha/2)\%$  da distribuição normal padrão. Manipulando os termos da equação F.4, isolando a média absoluta, tem-se

$$P\{\bar{X} - z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{X} + z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}\} = 1 - \alpha, \quad (\text{G.5})$$

onde  $\alpha$  é o valor complementar ao nível de confiança. Para determinar o intervalo de confiança quando a variância populacional é conhecida, aplica-se a relação

$$\bar{x} - z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}, \quad (\text{G.6})$$

sendo  $\bar{x}$  a média da amostra aleatória de tamanho  $n$  com uma população com uma variância conhecida  $\sigma^2$  e um nível de confiança  $1-\alpha$  para uma média absoluta  $\mu$ .

## APÊNDICE H – TESTES DE HIPÓTESES

O teste de hipótese é um método estatístico fundamental aplicado no estágio de análise de dados de um experimento comparativo, onde há um interesse em comparar, por exemplo, a média de uma população com certo valor especificado. Esses experimentos comparativos simples fornecem uma boa base para problemas mais complexos de planejamento de experimentos (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

No campo das ciências exatas, em diversos casos, há situações em que é preciso decidir entre aceitar ou rejeitar uma afirmação acerca de algum parâmetro, como média, proporção, desvio padrão, variância entre outros, referente a uma população ou a uma distribuição com base em dados de uma amostra. Afirmações de aceitação ou rejeição acerca de uma amostra aleatória oriunda de uma população são chamadas de hipóteses e a decisão sobre a hipótese é chamada de teste de hipóteses. Logo, teste de hipóteses é o processo de determinar se o resultado aponta entre o positivo e o negativo. A hipótese nula  $H_0$  consiste em um único ponto, enquanto a hipótese alternativa  $H_1$  consiste em mais de um ponto. Para decidir entre  $H_0$  e  $H_1$  é preciso de um teste estatístico. Quando a hipótese  $H_0$  é rejeitada por ser inconsistente, a hipótese  $H_1$  é aceita e, quando a hipótese  $H_0$  é aceita por ser consistente, a hipótese  $H_1$  é rejeitada. Supondo que esteja analisando a média de uma amostra e há a intenção de averiguar se, dentro de determinadas condições, a média é considerada igual ou não a um determinado valor, a hipótese  $H_0$  vai indicar que as médias são iguais e a hipótese  $H_1$  vai indicar que pelo menos uma das médias é diferente. (MEYER, 1965; MOOD; GRAYBILL, F. A.; BOES, 1974; MORETTIN; BUSSAB, 2004).

O teste de hipóteses pode ser bilateral onde a hipótese alternativa especifica valores que podem ser maiores ou menores que o parâmetro analisado. Desta forma, a hipótese nula é dada por

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad (H.1)$$

e a hipótese alternativa por

$$H_1: \mu \neq \mu_0. \quad (H.2)$$

O teste de hipótese pode ser unilateral onde a hipótese alternativa especifica valores que podem ser diferentes do parâmetro analisado. Assim, quando a hipótese alternativa apresenta valores menores que o parâmetro analisado, a hipótese nula é dada por

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad (H.3)$$

e a hipótese alternativa por

$$H_1: \mu < \mu_0. \quad (H.4)$$

Por outro lado, quando a hipótese alternativa apresenta valores maiores que o parâmetro analisado, a hipótese nula é dada por

$$H_0: \mu = \mu_0 \quad (H.5)$$

e a hipótese alternativa por

$$H_1: \mu > \mu_0. \quad (H.6)$$

Há uma relação íntima entre o teste de uma hipótese acerca de um parâmetro e o intervalo de confiança. Podem-se estipular hipóteses que determinam se o valor esperado de uma determinada amostra está dentro do intervalo de confiança. Caso  $[a,b]$  seja um intervalo de confiança de  $1-\alpha$  para o parâmetro  $\theta$ , o teste de tamanho  $\alpha$  das hipóteses leva à rejeição de  $H_0$  se  $\theta_0$  não estiver no intervalo de confiança  $[a,b]$  de  $1-\alpha$ . No caso da hipótese nula

$$H_0: \theta = \theta_0 \quad (H.7)$$

e no caso da hipótese alternativa

$$H_1: \theta \neq \theta_0. \quad (H.8)$$

## APÊNDICE I – Resultados Experimentais

TABELA 23 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO  
COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
ε <sub>A</sub>	-2,799E-06	-6,155E-06	-1,017E-05	-1,415E-05	-1,935E-05
ε <sub>B</sub>	-6,176E-07	-1,465E-06	-2,520E-06	-3,583E-06	-4,765E-06
ε <sub>C</sub>	3,820E-07	7,914E-07	1,256E-06	1,685E-06	2,379E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
ε <sub>A</sub>	-2,38E-05	-2,84E-05	-3,36E-05	-3,82E-05	-4,23E-05
ε <sub>B</sub>	-5,75E-06	-6,81E-06	-7,71E-06	-8,80E-06	-9,57E-06
ε <sub>C</sub>	3,02E-06	3,70E-06	4,45E-06	4,95E-06	6,05E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
ε <sub>A</sub>	-4,618E-05	-5,067E-05	-5,479E-05	-5,860E-05	-6,330E-05
ε <sub>B</sub>	-9,850E-06	-1,028E-05	-1,117E-05	-1,127E-05	-1,139E-05
ε <sub>C</sub>	6,885E-06	7,350E-06	8,532E-06	9,343E-06	1,021E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
ε <sub>A</sub>	-6,765E-05	-7,152E-05	-7,886E-05	-7,779E-05	-8,028E-05
ε <sub>B</sub>	-1,186E-05	-1,251E-05	-1,307E-05	-1,357E-05	-1,410E-05
ε <sub>C</sub>	1,079E-05	1,170E-05	1,358E-05	1,337E-05	1,393E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 24 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO  
COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
ε <sub>A</sub>	-2,555E-06	-5,925E-06	-9,706E-06	-1,389E-05	-1,822E-05
ε <sub>B</sub>	-4,640E-07	-1,122E-06	-1,886E-06	-2,702E-06	-3,503E-06
ε <sub>C</sub>	3,570E-07	7,595E-07	1,196E-06	1,703E-06	2,245E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
ε <sub>A</sub>	-2,318E-05	-2,680E-05	-3,260E-05	-3,613E-05	-4,043E-05
ε <sub>B</sub>	-4,502E-06	-5,258E-06	-5,867E-06	-6,359E-06	-7,033E-06
ε <sub>C</sub>	2,662E-06	3,290E-06	4,197E-06	4,627E-06	5,416E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
ε <sub>A</sub>	-4,323E-05	-4,947E-05	-5,147E-05	-5,608E-05	-5,749E-05
ε <sub>B</sub>	-7,592E-06	-7,729E-06	-7,793E-06	-8,322E-06	-8,754E-06
ε <sub>C</sub>	6,517E-06	6,946E-06	8,130E-06	8,394E-06	9,800E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
ε <sub>A</sub>	-6,331E-05	-6,337E-05	-6,377E-05	-6,537E-05	-6,688E-05
ε <sub>B</sub>	-8,921E-06	-9,732E-06	-1,078E-05	-1,059E-05	-1,670E-05
ε <sub>C</sub>	1,127E-05	1,106E-05	1,265E-05	1,341E-05	1,605E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 25 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-2,683E-06	-5,917E-06	-9,810E-06	-1,510E-05	-2,023E-05
$\epsilon_B$	-5,981E-07	-1,457E-06	-2,427E-06	-3,404E-06	-4,440E-06
$\epsilon_C$	3,801E-07	8,001E-07	1,228E-06	1,748E-06	2,260E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,279E-05	-2,848E-05	-3,209E-05	-3,590E-05	-4,225E-05
$\epsilon_B$	-5,336E-06	-6,627E-06	-7,510E-06	-8,111E-06	-8,731E-06
$\epsilon_C$	2,879E-06	3,561E-06	4,304E-06	4,957E-06	5,589E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-4,531E-05	-4,885E-05	-5,254E-05	-5,933E-05	-5,935E-05
$\epsilon_B$	-9,641E-06	-1,020E-05	-1,041E-05	-1,061E-05	-1,034E-05
$\epsilon_C$	6,529E-06	7,431E-06	8,271E-06	9,185E-06	9,389E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-6,267E-05	-6,197E-05	-6,293E-05	-6,463E-05	-6,463E-05
$\epsilon_B$	-1,107E-05	-1,337E-05	-1,438E-05	-1,052E-05	-1,074E-05
$\epsilon_C$	1,136E-05	9,828E-06	1,052E-05	6,751E-06	6,848E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 26 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-2,526E-06	-5,609E-06	-9,067E-06	-1,298E-05	-1,728E-05
$\epsilon_B$	-4,914E-07	-1,194E-06	-2,005E-06	-2,852E-06	-3,727E-06
$\epsilon_C$	3,527E-07	7,162E-07	1,174E-06	1,541E-06	2,083E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,168E-05	-2,636E-05	-3,078E-05	-3,590E-05	-3,879E-05
$\epsilon_B$	-4,605E-06	-5,561E-06	-6,116E-06	-6,860E-06	-7,298E-06
$\epsilon_C$	2,680E-06	3,263E-06	3,808E-06	4,518E-06	5,410E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-4,277E-05	-4,538E-05	-5,015E-05	-5,390E-05	-5,571E-05
$\epsilon_B$	-7,832E-06	-8,339E-06	-8,662E-06	-8,946E-06	-9,282E-06
$\epsilon_C$	6,113E-06	6,891E-06	7,636E-06	8,306E-06	9,185E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-6,014E-05	-5,975E-05	-7,781E-05	-7,871E-05	-8,746E-05
$\epsilon_B$	-8,392E-06	-1,018E-05	-1,004E-05	-9,806E-06	-1,114E-05
$\epsilon_C$	1,005E-05	1,475E-05	1,515E-05	1,417E-05	1,725E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 27 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

(continuação)

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-2,476E-06	-5,870E-06	-9,168E-06	-1,302E-05	-1,792E-05
$\epsilon_B$	-4,665E-07	-1,148E-06	-1,909E-06	-2,734E-06	-3,549E-06
$\epsilon_C$	3,496E-07	7,560E-07	1,172E-06	1,567E-06	2,078E-06

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,275E-05	-2,619E-05	-3,143E-05	-3,553E-05	-3,895E-05
$\epsilon_B$	-4,524E-06	-5,137E-06	-5,885E-06	-6,524E-06	-6,972E-06
$\epsilon_C$	2,643E-06	3,388E-06	3,831E-06	4,767E-06	5,523E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-4,303E-05	-4,719E-05	-5,133E-05	-5,498E-05	-5,786E-05
$\epsilon_B$	-7,712E-06	-7,758E-06	-8,420E-06	-8,167E-06	-8,306E-06
$\epsilon_C$	6,131E-06	6,618E-06	7,416E-06	8,366E-06	8,972E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-5,926E-05	-5,917E-05	-5,901E-05	-5,899E-05	-5,897E-05
$\epsilon_B$	-8,217E-06	-8,239E-06	-8,317E-06	-8,321E-06	-8,353E-06
$\epsilon_C$	9,003E-06	8,713E-06	9,191E-06	9,217E-06	9,208E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 28 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-3,259E-06	-7,201E-06	-1,177E-05	-1,682E-05	-2,237E-05
$\epsilon_B$	-5,882E-07	-1,409E-06	-2,345E-06	-3,364E-06	-4,358E-06
$\epsilon_C$	3,211E-07	6,485E-07	9,987E-07	1,368E-06	1,754E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,765E-05	-3,364E-05	-4,013E-05	-4,314E-05	-5,000E-05
$\epsilon_B$	-5,388E-06	-6,363E-06	-7,114E-06	-7,828E-06	-8,284E-06
$\epsilon_C$	2,300E-06	2,927E-06	3,450E-06	4,283E-06	4,649E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-5,546E-05	-5,924E-05	-6,318E-05	-6,886E-05	-7,455E-05
$\epsilon_B$	-8,993E-06	-9,518E-06	-9,908E-06	-9,916E-06	-1,033E-05
$\epsilon_C$	5,628E-06	6,490E-06	7,166E-06	8,011E-06	9,082E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-7,865E-05	-7,898E-05	-7,713E-05	-7,603E-05	-7,522E-05
$\epsilon_B$	-1,135E-05	-1,116E-05	-1,158E-05	-1,128E-05	-1,196E-05
$\epsilon_C$	9,581E-06	9,517E-06	1,114E-05	9,745E-06	1,169E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 29 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

(continuação)

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-3,002E-06	-6,666E-06	-1,126E-05	-1,632E-05	-2,088E-05
$\epsilon_B$	-6,128E-07	-1,403E-06	-2,388E-06	-3,525E-06	-4,396E-06
$\epsilon_C$	2,928E-07	5,942E-07	9,107E-07	1,252E-06	1,685E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,599E-05	-3,182E-05	-3,681E-05	-4,230E-05	-4,604E-05
$\epsilon_B$	-5,508E-06	-6,397E-06	-7,433E-06	-8,232E-06	-8,573E-06
$\epsilon_C$	2,125E-06	2,671E-06	3,245E-06	3,855E-06	4,481E-06

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-5,164E-05	-5,508E-05	-5,854E-05	-6,573E-05	-6,719E-05
$\epsilon_B$	-9,369E-06	-1,007E-05	-1,007E-05	-1,060E-05	-1,063E-05
$\epsilon_C$	5,147E-06	5,908E-06	6,885E-06	7,343E-06	8,244E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-6,841E-05	-7,014E-05	-6,924E-05	-7,262E-05	-7,432E-05
$\epsilon_B$	-1,156E-05	-1,231E-05	-1,311E-05	-1,360E-05	-1,494E-05
$\epsilon_C$	9,341E-06	1,700E-05	1,144E-05	1,158E-05	1,210E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 30 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-2,813E-06	-6,256E-06	-1,010E-05	-1,475E-05	-1,972E-05
$\epsilon_B$	-6,750E-07	-1,633E-06	-2,782E-06	-3,883E-06	-5,041E-06
$\epsilon_C$	2,812E-07	5,494E-07	8,279E-07	1,199E-06	1,494E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,414E-05	-2,853E-05	-3,440E-05	-3,948E-05	-4,269E-05
$\epsilon_B$	-6,173E-06	-7,297E-06	-8,149E-06	-9,349E-06	-1,016E-05
$\epsilon_C$	2,049E-06	2,499E-06	3,020E-06	3,610E-06	4,279E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-4,651E-05	-5,196E-05	-5,584E-05	-5,960E-05	-6,264E-05
$\epsilon_B$	-1,076E-05	-1,093E-05	-1,129E-05	-1,157E-05	-1,198E-05
$\epsilon_C$	4,948E-06	5,497E-06	6,135E-06	7,155E-06	7,378E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-6,376E-05	-6,680E-05	-7,232E-05	-9,517E-05	-9,760E-05
$\epsilon_B$	-1,292E-05	-1,463E-05	-2,437E-05	-1,708E-05	-1,529E-05
$\epsilon_C$	7,818E-06	8,164E-06	8,763E-06	9,164E-06	9,256E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 31 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

(continuação)

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-3,144E-06	-7,110E-06	-1,136E-05	-1,599E-05	-2,249E-05
$\epsilon_B$	-5,635E-07	-1,375E-06	-2,264E-06	-3,282E-06	-4,265E-06
$\epsilon_C$	3,101E-07	6,291E-07	9,374E-07	1,329E-06	1,799E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,711E-05	-3,360E-05	-3,861E-05	-4,282E-05	-4,831E-05
$\epsilon_B$	-5,106E-06	-6,058E-06	-7,049E-06	-7,598E-06	-8,038E-06
$\epsilon_C$	2,237E-06	2,786E-06	3,470E-06	3,967E-06	4,548E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-5,352E-05	-5,682E-05	-6,100E-05	-6,847E-05	-7,070E-05
$\epsilon_B$	-8,818E-06	-8,872E-06	-9,723E-06	-9,987E-06	-9,990E-06
$\epsilon_C$	5,295E-06	6,348E-06	6,907E-06	7,595E-06	8,878E-06

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-7,437E-05	-7,821E-05	-7,424E-05	-7,432E-05	-6,990E-05
$\epsilon_B$	-1,005E-05	-1,008E-05	-1,017E-05	-1,018E-05	-1,022E-05
$\epsilon_C$	7,578E-06	7,438E-06	4,001E-06	1,287E-06	5,008E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 32 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE ALUMÍNIO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-3,053E-06	-6,985E-06	-1,103E-05	-1,604E-05	-2,077E-05
$\epsilon_B$	-5,724E-07	-1,357E-06	-2,361E-06	-3,330E-06	-4,271E-06
$\epsilon_C$	2,997E-07	6,111E-07	9,456E-07	1,325E-06	1,655E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2,591E-05	-3,076E-05	-3,706E-05	-4,120E-05	-4,800E-05
$\epsilon_B$	-5,549E-06	-6,504E-06	-6,927E-06	-8,254E-06	-8,788E-06
$\epsilon_C$	2,222E-06	2,699E-06	3,136E-06	3,884E-06	4,618E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-5,247E-05	-5,519E-05	-6,016E-05	-6,546E-05	-6,658E-05
$\epsilon_B$	-9,147E-06	-9,754E-06	-9,733E-06	-9,928E-06	-9,917E-06
$\epsilon_C$	5,195E-06	5,920E-06	6,793E-06	7,358E-06	8,710E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-6,691E-05	-7,297E-05	-7,246E-05	-7,224E-05	-7,277E-05
$\epsilon_B$	-1,010E-05	-9,938E-06	-9,786E-06	-9,824E-06	-9,874E-06
$\epsilon_C$	8,172E-06	7,901E-06	8,334E-06	8,097E-06	8,555E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 33 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,158E-06	-9,630E-06	-1,583E-05	-2,175E-05	-2,905E-05
$\epsilon_B$	-1,313E-06	-3,057E-06	-4,943E-06	-7,068E-06	-8,961E-06
$\epsilon_C$	3,506E-07	7,021E-07	1,097E-06	1,560E-06	2,066E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,595E-05	-4,411E-05	-4,906E-05	-5,671E-05	-6,240E-05
$\epsilon_B$	-1,075E-05	-1,274E-05	-1,489E-05	-1,620E-05	-1,768E-05
$\epsilon_C$	2,701E-06	3,493E-06	4,174E-06	5,138E-06	5,771E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-6,732E-05	-7,657E-05	-8,051E-05	-8,281E-05	-8,564E-05
$\epsilon_B$	-1,876E-05	-2,012E-05	-2,003E-05	-2,101E-05	-2,212E-05
$\epsilon_C$	6,757E-06	8,096E-06	8,835E-06	9,852E-06	1,101E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-8,741E-05	-9,071E-05	-9,484E-05	-9,959E-05	-1,011E-04
$\epsilon_B$	-2,193E-05	-2,267E-05	-2,326E-05	-2,394E-05	-2,428E-05
$\epsilon_C$	1,136E-05	1,197E-05	1,222E-05	1,333E-05	1,409E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 34 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,332E-06	-9,865E-06	-1,564E-05	-2,227E-05	-2,859E-05
$\epsilon_B$	-1,167E-06	-2,545E-06	-4,203E-06	-6,419E-06	-7,794E-06
$\epsilon_C$	3,492E-07	7,346E-07	1,156E-06	1,585E-06	2,000E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,664E-05	-4,345E-05	-4,983E-05	-5,576E-05	-6,538E-05
$\epsilon_B$	-9,774E-06	-1,117E-05	-1,279E-05	-1,418E-05	-1,540E-05
$\epsilon_C$	2,737E-06	3,476E-06	4,352E-06	4,836E-06	6,060E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7,385E-05	-7,592E-05	-8,304E-05	-8,789E-05	-9,426E-05
$\epsilon_B$	-1,632E-05	-1,710E-05	-1,730E-05	-1,787E-05	-1,870E-05
$\epsilon_C$	6,774E-06	7,965E-06	9,003E-06	9,870E-06	1,136E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-9,697E-05	-1,007E-04	-1,053E-04	-1,265E-04	-1,320E-04
$\epsilon_B$	-1,943E-05	-2,103E-05	-2,199E-05	-2,669E-05	-2,852E-05
$\epsilon_C$	1,263E-05	1,342E-05	1,285E-05	1,660E-05	1,937E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 35 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,573E-06	-1,029E-05	-1,665E-05	-2,380E-05	-3,119E-05
$\epsilon_B$	-1,202E-06	-2,795E-06	-4,611E-06	-6,478E-06	-8,374E-06
$\epsilon_C$	3,728E-07	7,471E-07	1,163E-06	1,656E-06	2,228E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,874E-05	-4,584E-05	-5,361E-05	-6,081E-05	-6,792E-05
$\epsilon_B$	-1,019E-05	-1,191E-05	-1,349E-05	-1,490E-05	-1,615E-05
$\epsilon_C$	2,892E-06	3,659E-06	4,493E-06	5,391E-06	6,359E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7,372E-05	-8,071E-05	-8,652E-05	-9,137E-05	-9,650E-05
$\epsilon_B$	-1,731E-05	-1,821E-05	-1,888E-05	-1,940E-05	-1,982E-05
$\epsilon_C$	7,344E-06	8,423E-06	9,485E-06	1,054E-05	1,160E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-1,034E-04	-1,085E-04	-1,125E-04	-1,158E-04	-1,197E-04
$\epsilon_B$	-2,328E-05	-2,984E-05	-4,099E-05	-5,653E-05	-4,536E-05
$\epsilon_C$	1,187E-05	1,335E-05	1,471E-05	1,653E-05	1,524E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 36 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,253E-06	-9,703E-06	-1,584E-05	-2,275E-05	-2,948E-05
$\epsilon_B$	-1,224E-06	-2,788E-06	-4,644E-06	-6,261E-06	-8,167E-06
$\epsilon_C$	3,438E-07	7,090E-07	1,104E-06	1,558E-06	2,065E-06

(continuação)

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,686E-05	-4,469E-05	-5,086E-05	-5,707E-05	-6,244E-05
$\epsilon_B$	-9,909E-06	-1,170E-05	-1,283E-05	-1,446E-05	-1,564E-05
$\epsilon_C$	2,679E-06	3,479E-06	4,243E-06	5,053E-06	5,892E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-6,948E-05	-7,666E-05	-8,121E-05	-8,518E-05	-9,036E-05
$\epsilon_B$	-1,649E-05	-1,732E-05	-1,819E-05	-1,907E-05	-1,960E-05
$\epsilon_C$	6,832E-06	7,891E-06	8,898E-06	9,880E-06	1,084E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-9,389E-05	-1,016E-04	-9,979E-05	-9,982E-05	-9,876E-05
$\epsilon_B$	-2,030E-05	-2,200E-05	-2,222E-05	-2,204E-05	-2,157E-05
$\epsilon_C$	1,092E-05	1,308E-05	1,325E-05	1,344E-05	1,361E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 37 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,316E-06	-9,800E-06	-1,598E-05	-2,231E-05	-2,985E-05
$\epsilon_B$	-1,255E-06	-2,702E-06	-4,857E-06	-6,568E-06	-8,314E-06
$\epsilon_C$	3,600E-07	7,216E-07	1,135E-06	1,604E-06	2,100E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,755E-05	-4,511E-05	-4,989E-05	-5,683E-05	-6,451E-05
$\epsilon_B$	-1,028E-05	-1,207E-05	-1,362E-05	-1,528E-05	-1,682E-05
$\epsilon_C$	2,798E-06	3,423E-06	4,193E-06	5,394E-06	5,635E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7,029E-05	-7,861E-05	-8,021E-05	-9,055E-05	-9,277E-05
$\epsilon_B$	-1,800E-05	-1,900E-05	-1,870E-05	-1,951E-05	-2,154E-05
$\epsilon_C$	6,887E-06	7,760E-06	9,235E-06	1,003E-05	1,062E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-9,378E-05	-9,502E-05	-9,669E-05	-1,008E-04	-1,069E-04
$\epsilon_B$	-2,225E-05	-2,416E-05	-2,681E-05	-2,744E-05	-2,918E-05
$\epsilon_C$	1,176E-05	1,329E-05	1,430E-05	1,557E-05	1,650E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 38 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO PRIMEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

(continuação)

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,444E-06	-1,008E-05	-1,612E-05	-2,330E-05	-2,995E-05
$\epsilon_B$	-1,301E-06	-3,031E-06	-4,805E-06	-7,087E-06	-9,083E-06
$\epsilon_C$	2,880E-07	5,419E-07	8,384E-07	1,157E-06	1,619E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,691E-05	-4,440E-05	-5,369E-05	-6,116E-05	-6,397E-05
$\epsilon_B$	-1,088E-05	-1,271E-05	-1,479E-05	-1,678E-05	-1,737E-05
$\epsilon_C$	2,082E-06	2,730E-06	3,361E-06	4,209E-06	4,735E-06

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7,138E-05	-7,917E-05	-8,651E-05	-9,257E-05	-9,077E-05
$\epsilon_B$	-1,844E-05	-1,963E-05	-2,156E-05	-2,201E-05	-2,211E-05
$\epsilon_C$	5,692E-06	6,729E-06	7,700E-06	8,878E-06	9,209E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-9,541E-05	-1,017E-04	-1,053E-04	-1,093E-04	-1,127E-04
$\epsilon_B$	-2,335E-05	-2,461E-05	-2,386E-05	-2,439E-05	-2,443E-05
$\epsilon_C$	9,956E-06	9,382E-06	9,706E-06	1,019E-05	9,892E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 39 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO SEGUNDO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,507E-06	-1,014E-05	-1,638E-05	-2,417E-05	-3,156E-05
$\epsilon_B$	-1,141E-06	-2,662E-06	-4,403E-06	-6,189E-06	-7,831E-06
$\epsilon_C$	2,898E-07	5,691E-07	8,679E-07	1,237E-06	1,664E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,737E-05	-4,465E-05	-5,241E-05	-6,200E-05	-6,816E-05
$\epsilon_B$	-9,463E-06	-1,098E-05	-1,242E-05	-1,378E-05	-1,566E-05
$\epsilon_C$	2,261E-06	2,827E-06	3,558E-06	4,314E-06	5,038E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7,483E-05	-7,841E-05	-8,600E-05	-9,345E-05	-9,462E-05
$\epsilon_B$	-1,672E-05	-1,772E-05	-1,865E-05	-1,843E-05	-1,888E-05
$\epsilon_C$	5,885E-06	7,056E-06	7,819E-06	9,123E-06	9,698E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-1,032E-04	-1,070E-04	-1,116E-04	-1,190E-04	-1,224E-04
$\epsilon_B$	-2,021E-05	-2,188E-05	-2,276E-05	-2,384E-05	-2,481E-05
$\epsilon_C$	1,036E-05	1,295E-05	1,325E-05	1,443E-05	1,461E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 40 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO TERCEIRO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

(continuação)

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,565E-06	-1,021E-05	-1,676E-05	-2,384E-05	-3,097E-05
$\epsilon_B$	-1,313E-06	-3,012E-06	-4,972E-06	-7,040E-06	-9,106E-06
$\epsilon_C$	2,940E-07	5,763E-07	8,736E-07	1,232E-06	1,683E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3,832E-05	-4,604E-05	-5,368E-05	-6,104E-05	-6,788E-05
$\epsilon_B$	-1,131E-05	-1,251E-05	-1,494E-05	-1,575E-05	-1,804E-05
$\epsilon_C$	2,223E-06	2,838E-06	3,506E-06	4,300E-06	5,188E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7,437E-05	-8,052E-05	-8,674E-05	-9,192E-05	-9,703E-05
$\epsilon_B$	-1,872E-05	-1,968E-05	-2,112E-05	-2,200E-05	-2,211E-05
$\epsilon_C$	6,091E-06	7,013E-06	7,862E-06	8,721E-06	9,839E-06

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-9,926E-05	-1,031E-04	-1,075E-04	-1,121E-04	-1,167E-04
$\epsilon_B$	-2,198E-05	-2,197E-05	-2,309E-05	-2,299E-05	-2,299E-05
$\epsilon_C$	1,152E-05	1,152E-05	1,241E-05	1,273E-05	1,330E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 41 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUARTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-5,002E-06	-1,105E-05	-1,803E-05	-2,556E-05	-3,302E-05
$\epsilon_B$	-1,179E-06	-2,723E-06	-4,472E-06	-6,411E-06	-8,272E-06
$\epsilon_C$	3,154E-07	6,119E-07	9,339E-07	1,323E-06	1,822E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-4,163E-05	-5,005E-05	-5,852E-05	-6,552E-05	-7,294E-05
$\epsilon_B$	-1,008E-05	-1,170E-05	-1,322E-05	-1,479E-05	-1,610E-05
$\epsilon_C$	2,414E-06	3,005E-06	3,767E-06	4,512E-06	5,532E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-8,022E-05	-8,669E-05	-9,198E-05	-1,009E-04	-1,088E-04
$\epsilon_B$	-1,700E-05	-1,810E-05	-1,898E-05	-1,933E-05	-2,000E-05
$\epsilon_C$	6,418E-06	7,342E-06	8,479E-06	9,564E-06	1,061E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-1,103E-04	-1,154E-04	-1,208E-04	-1,253E-04	-1,301E-04
$\epsilon_B$	-2,105E-05	-2,194E-05	-2,167E-05	-9,112E-06	-8,800E-06
$\epsilon_C$	1,150E-05	1,269E-05	1,348E-05	1,464E-05	1,515E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 42 - DEFORMAÇÕES RELAXADAS NO QUINTO CORPO DE PROVA DE AÇO COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4,683E-06	-1,071E-05	-1,749E-05	-2,478E-05	-3,254E-05
$\epsilon_B$	-1,259E-06	-2,894E-06	-4,791E-06	-6,766E-06	-8,764E-06
$\epsilon_C$	3,047E-07	5,865E-07	8,946E-07	1,268E-06	1,771E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-4,039E-05	-4,813E-05	-5,610E-05	-6,330E-05	-7,087E-05
$\epsilon_B$	-1,067E-05	-1,245E-05	-1,417E-05	-1,570E-05	-1,695E-05
$\epsilon_C$	2,257E-06	2,985E-06	3,674E-06	4,426E-06	5,432E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7,766E-05	-8,260E-05	-9,086E-05	-9,668E-05	-1,006E-04
$\epsilon_B$	-1,825E-05	-1,920E-05	-2,012E-05	-2,036E-05	-2,109E-05
$\epsilon_C$	6,181E-06	7,205E-06	8,236E-06	9,039E-06	1,027E-05
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-1,029E-04	-1,031E-04	-1,079E-04	-1,059E-04	-1,060E-04
$\epsilon_B$	-2,178E-05	-2,277E-05	-2,433E-05	-2,692E-05	-2,708E-05
$\epsilon_C$	1,027E-05	1,164E-05	1,071E-05	1,110E-05	1,125E-05

FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE J – ANÁLISE DA VARIÂNCIA SIMPLES

TABELA 43 - RESULTADOS DA ANOVA

Profundidade	Extensômetro A	Extensômetro B	Extensômetro C
0,05 mm	F = 163,7 P-valor = 3,23e-12	F = 184,6 P-valor = 1,27e-12	F = 32,88 P-valor = 4,5e-07
0,10 mm	F = 229,2 P-valor = 2,36e-13	F = 138,6 P-valor = 1,17e-11	F = 46,2 P-valor = 4,18e-08
0,15 mm	F = 189,6 P-valor = 1,04e-12	F = 139,6 P-valor = 1,11e-11	F = 67,06 P-valor = 2,8e-09
0,20 mm	F = 188,8 P-valor = 1,07e-12	F = 160,2 P-valor = 3,81e-12	F = 47,03 P-valor = 3,69e-08
0,25 mm	F = 152,4 P-valor = 5,63e-12	F = 131,9 P-valor = 1,71e-11	F = 32,46 P-valor = 4,91e-07
0,30 mm	F = 166,3 P-valor = 2,86e-12	F = 152,7 P-valor = 5,53e-12	F = 34,99 P-valor = 2,94e-07
0,35 mm	F = 146,9 P-valor = 7,44e-12	F = 134,8 P-valor = 1,44e-11	F = 39,05 P-valor = 1,37e-07
0,40 mm	F = 155,9 P-valor = 4,72e-12	F = 103,3 P-valor = 1,1e-10	F = 27,78 P-valor = 1,4e-06
0,45 mm	F = 294,3 P-valor = 3,34e-14	F = 105 P-valor = 9,77e-11	F = 34,32 P-valor = 3,36e-07
0,50 mm	F = 134,3 P-valor = 1,49e-11	F = 119,1 P-valor = 3,74e-11	F = 27,77 P-valor = 1,4e-06
0,55 mm	F = 138,3 P-valor = 1,19e-11	F = 134 P-valor = 1,51e-11	F = 33,13 P-valor = 4,28e-07
0,60 mm	F = 202,3 P-valor = 6,26e-13	F = 126 P-valor = 2,43e-11	F = 34,27 P-valor = 3,39e-07
0,65 mm	F = 242,9 P-valor = 1,5e-13	F = 123 P-valor = 2,91e-11	F = 33,25 P-valor = 4,16e-07
0,70 mm	F = 142,7 P-valor = 9,34e-12	F = 106,8 P-valor = 8,58e-11	F = 40,32 P-valor = 1,1e-07
0,75 mm	F = 76,58 P-valor = 1,05e-09	F = 118,3 P-valor = 3,94e-11	F = 20,49 P-valor = 1e-05
0,80 mm	F = 65,59 P-valor = 3,3e-09	F = 104,7 P-valor = 9,93e-11	F = 13,26 P-valor = 0,132e-03
0,85 mm	F = 64,97 P-valor = 3,54e-09	F = 45,19 P-valor = 4,9e-08	F = 1,323 P-valor = 0,302
0,90 mm	F = 47,92 P-valor = 3,22e-08	F = 10,37 P-valor = 0,493e-03	F = 4,423 P-valor = 0,0191
0,95 mm	F = 26,27 P-valor = 2,03e-06	F = 6,849 P-valor = 3,52e-03	F = 5,384 P-valor = 9,37e-03
1,00 mm	F = 19,93 P-valor = 1,19e-05	F = 9,054 P-valor = 0,974e-03	F = 3,61 P-valor = 0,0365

FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE L – IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENÇA ENTRE AS MÉDIAS

TABELA 44 - RESULTADOS DAS COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS ENTRE AS MÉDIAS  
(continua)

Profundidade	Extensômetro A		Extensômetro B		Extensômetro C	
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,05 mm	3-4:	0,0467	3-4:	0,9985	3-4:	0,9905
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000
	1-2:	0,0040	1-2:	0,2867	1-2:	0,7264
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,10 mm	3-4:	0,0579	3-4:	0,8291	3-4:	0,4263
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0001
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000
	1-2:	0,0017	1-2:	0,4307	1-2:	0,1582
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,15 mm	3-4:	0,0802	3-4:	0,9960	3-4:	0,4256
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000
	1-2:	0,0043	1-2:	0,3620	1-2:	0,0641
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,20 mm	3-4:	0,0184	3-4:	0,9172	3-4:	0,6272
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000
	1-2:	0,0038	1-2:	0,2525	1-2:	0,5645
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,25 mm	3-4:	0,0642	3-4:	0,7753	3-4:	0,9544
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0001
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0002
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000
	1-2:	0,0104	1-2:	0,4314	1-2:	0,3267
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,30 mm	3-4:	0,2169	3-4:	0,8134	3-4:	0,8560
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000
	1-2:	0,0077	1-2:	0,3164	1-2:	0,9973
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,35 mm	3-4:	0,3067	3-4:	0,9812	3-4:	0,3150
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0001
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000
	1-2:	0,0054	1-2:	0,4169	1-2:	0,8815
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor

(continuação)

Profundidade	Extensômetro A		Extensômetro B		Extensômetro C	
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,40 mm	3-4:	0,0150	3-4:	0,8930	3-4:	0,1136
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0030
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0002
	1-2:	0,0026	1-2:	0,5639	1-2:	0,5476
0,45 mm	3-4:	0,0006	3-4:	0,9285	3-4:	0,0190
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0266
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0001
	1-2:	0,0004	1-2:	0,4296	1-2:	0,0316
0,50 mm	3-4:	0,0886	3-4:	0,8617	3-4:	0,0045
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,0968
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0015
	1-2:	0,0062	1-2:	0,5351	1-2:	0,1973
0,55 mm	3-4:	0,0778	3-4:	0,8816	3-4:	0,0013
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,1676
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0007
	1-2:	0,0027	1-2:	0,4819	1-2:	0,0582
0,60 mm	3-4:	0,1312	3-4:	0,8694	3-4:	0,0005
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0004
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,9995
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0007
	1-2:	0,0017	1-2:	0,5006	1-2:	0,0009
0,65 mm	3-4:	0,0068	3-4:	0,2100	3-4:	0,0004
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0003
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,9997
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0012
	1-2:	0,0009	1-2:	0,6386	1-2:	0,0014
0,70 mm	3-4:	0,0136	3-4:	0,5577	3-4:	0,0004
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,4710
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0002
	1-2:	0,0033	1-2:	0,6462	1-2:	0,0038

(conclusão)

Profundidade	Extensômetro A		Extensômetro B		Extensômetro C	
	Casos	p-valor	Casos	p-valor	Casos	p-valor
0,75 mm	3-4:	0,1873	3-4:	0,9268	3-4:	0,0315
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0027
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,6232
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,0014
	1-2:	0,0285	1-2:	0,6310	1-2:	0,0166
0,80 mm	3-4:	0,1823	3-4:	0,9930	3-4:	0,0074
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,0031
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,0001
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,9724
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,1337
	1-2:	0,1280	1-2:	0,3600	1-2:	0,2690
0,85 mm	3-4:	0,2738	3-4:	0,8125	3-4:	0,8598
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0000	2-4:	0,7149
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0000	1-4:	0,2394
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0000	2-3:	0,9921
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0000	1-3:	0,6444
	1-2:	0,0505	1-2:	0,9437	1-2:	0,8019
0,90 mm	3-4:	0,2057	3-4:	0,6411	3-4:	0,1291
	2-4:	0,0000	2-4:	0,0048	2-4:	0,0861
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0010	1-4:	0,0143
	2-3:	0,0000	2-3:	0,0518	2-3:	0,9957
	1-3:	0,0000	1-3:	0,0116	1-3:	0,6661
	1-2:	0,7067	1-2:	0,8727	1-2:	0,7935
0,95 mm	3-4:	0,7780	3-4:	0,2602	3-4:	0,2718
	2-4:	0,0001	2-4:	0,0099	2-4:	0,0860
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0048	1-4:	0,0057
	2-3:	0,0008	2-3:	0,3283	2-3:	0,9016
	1-3:	0,0000	1-3:	0,1910	1-3:	0,2095
	1-2:	0,4826	1-2:	0,9840	1-2:	0,5336
1,00 mm	3-4:	0,8545	3-4:	0,2067	3-4:	0,3547
	2-4:	0,0003	2-4:	0,0023	2-4:	0,3113
	1-4:	0,0000	1-4:	0,0021	1-4:	0,0217
	2-3:	0,0016	2-3:	0,1349	2-3:	0,9997
	1-3:	0,0003	1-3:	0,1207	1-3:	0,4145
	1-2:	0,8265	1-2:	0,9999	1-2:	0,4652

FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE M – ANÁLISE DA INTERAÇÃO ENTRE OS FATORES

TABELA 45 - RESULTADOS DAS INTERAÇÕES ENTRE OS FATORES.

Profundidade	Extensômetro A	Extensômetro B	Extensômetro C
0,05 mm	P-valor = 0,816	P-valor = 0,889	P-valor = 0,826
0,10 mm	P-valor = 0,879	P-valor = 0,938	P-valor = 0,775
0,15 mm	P-valor = 0,858	P-valor = 0,867	P-valor = 0,845
0,20 mm	P-valor = 0,776	P-valor = 0,962	P-valor = 0,621
0,25 mm	P-valor = 0,896	P-valor = 0,955	P-valor = 0,852
0,30 mm	P-valor = 0,987	P-valor = 0,907	P-valor = 0,916
0,35 mm	P-valor = 0,873	P-valor = 0,902	P-valor = 0,966
0,40 mm	P-valor = 0,924	P-valor = 0,916	P-valor = 0,929
0,45 mm	P-valor = 0,801	P-valor = 0,966	P-valor = 0,666
0,50 mm	P-valor = 0,995	P-valor = 0,919	P-valor = 0,815
0,55 mm	P-valor = 0,907	P-valor = 0,937	P-valor = 0,816
0,60 mm	P-valor = 0,880	P-valor = 0,881	P-valor = 0,847
0,65 mm	P-valor = 0,978	P-valor = 0,972	P-valor = 0,696
0,70 mm	P-valor = 0,974	P-valor = 0,928	P-valor = 0,979
0,75 mm	P-valor = 0,677	P-valor = 0,886	P-valor = 0,794
0,80 mm	P-valor = 0,478	P-valor = 0,971	P-valor = 0,339
0,85 mm	P-valor = 0,465	P-valor = 0,836	P-valor = 0,578
0,90 mm	P-valor = 0,979	P-valor = 0,555	P-valor = 0,547
0,95 mm	P-valor = 0,919	P-valor = 0,308	P-valor = 0,859
1,00 mm	P-valor = 0,807	P-valor = 0,406	P-valor = 0,873

FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE N – HOMOGENEIDADE DAS VARIÂNCIAS

TABELA 46 - HOMOGENEIDADE DAS VARIÂNCIAS

Profundidade	Extensômetro A	Extensômetro B	Extensômetro C
0,05 mm	$\chi^2 = 1,0656$ p-valor = 0,7854	$\chi^2 = 1,2947$ p-valor = 0,7304	$\chi^2 = 0,6435$ p-valor = 0,8864
0,10 mm	$\chi^2 = 2,5757$ p-valor = 0,4618	K = 0,9374 p-valor = 0,8164	K = 1,9858 p-valor = 0,5754
0,15 mm	$\chi^2 = 2,1454$ p-valor = 0,5428	$\chi^2 = 0,6664$ p-valor = 0,8811	$\chi^2 = 2,5513$ p-valor = 0,4661
0,20 mm	$\chi^2 = 0,1260$ p-valor = 0,9885	$\chi^2 = 1,1506$ p-valor = 0,7649	$\chi^2 = 2,2276$ p-valor = 0,5265
0,25 mm	$\chi^2 = 0,1865$ p-valor = 0,9797	$\chi^2 = 1,3557$ p-valor = 0,7160	$\chi^2 = 1,0843$ p-valor = 0,7809
0,30 mm	$\chi^2 = 3,5084$ p-valor = 0,3197	$\chi^2 = 2,0891$ p-valor = 0,5541	$\chi^2 = 1,8090$ p-valor = 0,6130
0,35 mm	$\chi^2 = 4,4546$ p-valor = 0,2164	$\chi^2 = 1,1478$ p-valor = 0,7655	$\chi^2 = 2,1354$ p-valor = 0,5448
0,40 mm	$\chi^2 = 2,2432$ p-valor = 0,5235	$\chi^2 = 2,0460$ p-valor = 0,5629	$\chi^2 = 2,5867$ p-valor = 0,4598
0,45 mm	$\chi^2 = 1,5335$ p-valor = 0,6745	$\chi^2 = 1,2651$ p-valor = 0,7374	$\chi^2 = 2,0133$ p-valor = 0,5697
0,50 mm	$\chi^2 = 1,7745$ p-valor = 0,6205	$\chi^2 = 0,4678$ p-valor = 0,9259	$\chi^2 = 2,0582$ p-valor = 0,5604
0,55 mm	$\chi^2 = 2,3321$ p-valor = 0,5064	$\chi^2 = 0,5264$ p-valor = 0,9130	$\chi^2 = 0,3648$ p-valor = 0,9474
0,60 mm	$\chi^2 = 1,3289$ p-valor = 0,7223	$\chi^2 = 1,3453$ p-valor = 0,7184	$\chi^2 = 1,3564$ p-valor = 0,7158
0,65 mm	$\chi^2 = 0,9172$ p-valor = 0,8213	$\chi^2 = 2,2364$ p-valor = 0,5248	$\chi^2 = 1,1349$ p-valor = 0,7686
0,70 mm	$\chi^2 = 0,9708$ p-valor = 0,8083	$\chi^2 = 2,3129$ p-valor = 0,5101	$\chi^2 = 1,4383$ p-valor = 0,6966
0,75 mm	$\chi^2 = 2,7706$ p-valor = 0,4284	$\chi^2 = 1,1313$ p-valor = 0,7695	$\chi^2 = 1,0537$ p-valor = 0,7883
0,80 mm	$\chi^2 = 1,4217$ p-valor = 0,7004	$\chi^2 = 0,7079$ p-valor = 0,8713	$\chi^2 = 0,8239$ p-valor = 0,8437
0,85 mm	$\chi^2 = 0,4257$ p-valor = 0,9349	$\chi^2 = 4,1803$ p-valor = 0,2426	$\chi^2 = 10,8400$ <b>p-valor = 0,0126</b>
0,90 mm	$\chi^2 = 4,1189$ p-valor = 0,2489	$\chi^2 = 13,0110$ <b>p-valor = 4,6130e-03</b>	$\chi^2 = 4,0532$ p-valor = 0,2558
0,95 mm	$\chi^2 = 0,7990$ p-valor = 0,8497	$\chi^2 = 14,7120$ <b>p-valor = 2,0800e-03</b>	$\chi^2 = 3,5243$ p-valor = 0,3176
1,00 mm	$\chi^2 = 0,6277$ p-valor = 0,8901	$\chi^2 = 7,2438$ p-valor = 0,0645	$\chi^2 = 2,4663$ p-valor = 0,4814

FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE O – NORMALIDADE DOS RESÍDUOS

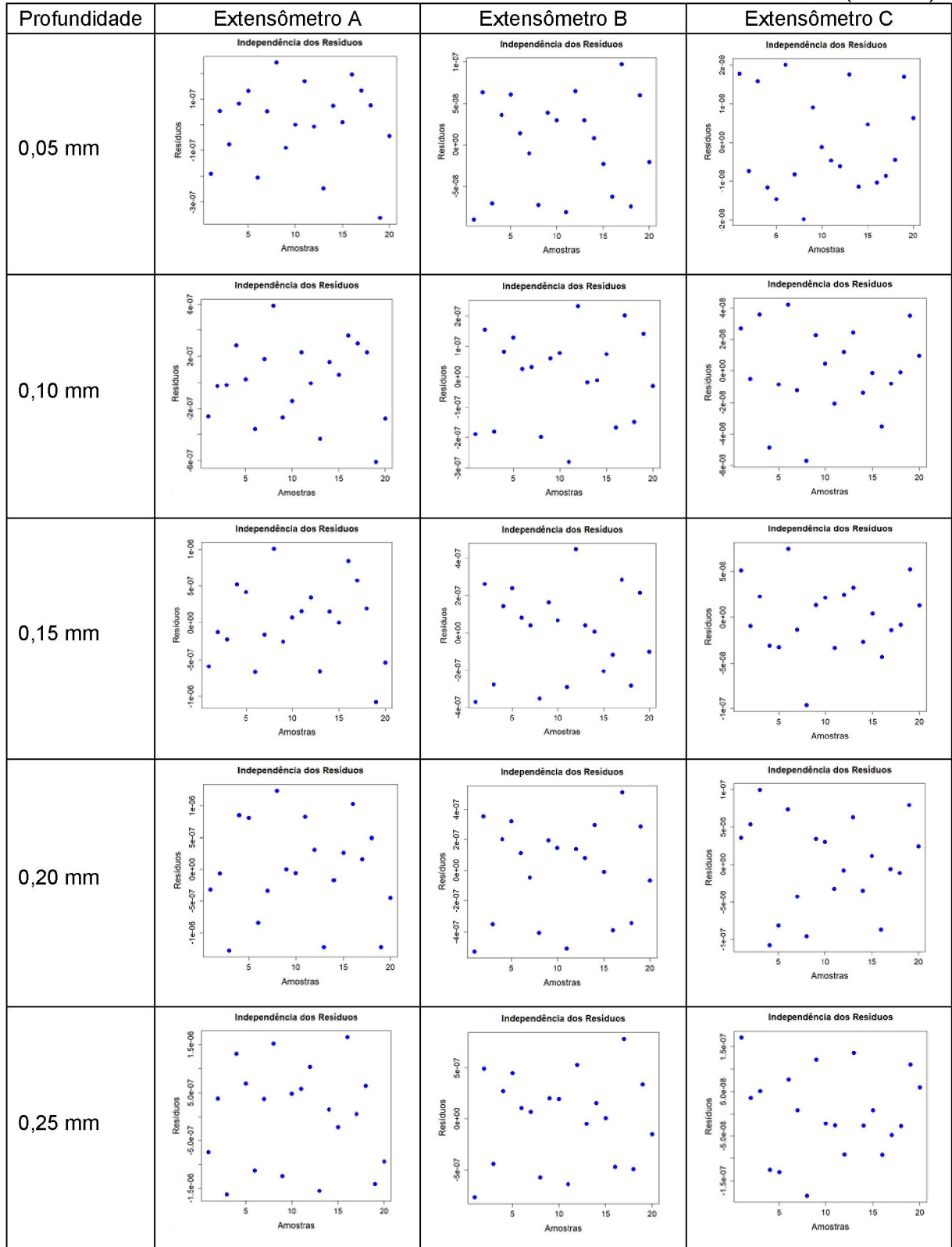
TABELA 47 - AVALIAÇÃO DA NORMALIDADE DOS RESÍDUOS VIA TESTE DE SHAPIRO-WILK

Profundidade	Extensômetro A	Extensômetro B	Extensômetro C
0,05 mm	W = 0,9558 p-valor = 0,4633	W = 0,9237 p-valor = 0,1166	W = 0,9118 p-valor = 0,0691
0,10 mm	W = 0,9825 p-valor = 0,9625	W = 0,9462 p-valor = 0,3128	W = 0,9640 p-valor = 0,6271
0,15 mm	W = 0,9864 p-valor = 0,9888	W = 0,9529 p-valor = 0,4139	W = 0,9752 p-valor = 0,8582
0,20 mm	W = 0,9541 p-valor = 0,4343	W = 0,9248 p-valor = 0,1227	W = 0,9596 p-valor = 0,5358
0,25 mm	W = 0,9376 p-valor = 0,2157	W = 0,9564 p-valor = 0,4744	W = 0,9806 p-valor = 0,9412
0,30 mm	W = 0,9722 p-valor = 0,8005	W = 0,9535 p-valor = 0,4227	W = 0,9676 p-valor = 0,7043
0,35 mm	W = 0,9844 p-valor = 0,9779	W = 0,9586 p-valor = 0,5156	W = 0,9581 p-valor = 0,5064
0,40 mm	W = 0,9593 p-valor = 0,5296	W = 0,9408 p-valor = 0,2480	W = 0,9599 p-valor = 0,5418
0,45 mm	W = 0,9284 p-valor = 0,1440	W = 0,9564 p-valor = 0,4748	W = 0,9727 p-valor = 0,8105
0,50 mm	W = 0,9777 p-valor = 0,9015	W = 0,9095 p-valor = 0,0623	W = 0,9732 p-valor = 0,8212
0,55 mm	W = 0,9677 p-valor = 0,7061	W = 0,8947 <b>p-valor = 0,0328</b>	W = 0,9310 p-valor = 0,1615
0,60 mm	W = 0,9685 p-valor = 0,7236	W = 0,9240 p-valor = 0,1182	W = 0,9567 p-valor = 0,4803
0,65 mm	W = 0,9403 p-valor = 0,2426	W = 0,9423 p-valor = 0,2654	W = 0,9682 p-valor = 0,7171
0,70 mm	W = 0,9780 p-valor = 0,9053	W = 0,938 p-valor = 0,2227	W = 0,86620 <b>p-valor = 0,0101</b>
0,75 mm	W = 0,9744 p-valor = 0,8434	W = 0,9398 p-valor = 0,2375	W = 0,9585 p-valor = 0,5151
0,80 mm	W = 0,9449 p-valor = 0,2961	W = 0,9340 p-valor = 0,1845	W = 0,9244 p-valor = 0,1203
0,85 mm	W = 0,9396 p-valor = 0,2354	W = 0,9124 p-valor = 0,0707	W = 0,8384 <b>p-valor = 0,0034</b>
0,90 mm	W = 0,9121 p-valor = 0,0700	W = 0,7989 <b>p-valor = 0,8318e-03</b>	W = 0,9669 p-valor = 0,6890
0,95 mm	W = 0,8714 <b>p-valor = 0,0124</b>	W = 0,8303 <b>p-valor = 2,5390e-03</b>	W = 0,9063 p-valor = 0,05431
1,00 mm	W = 0,8983 <b>p-valor = 0,0383</b>	W = 0,9364 p-valor = 0,2051	W = 0,9782 p-valor = 0,9094

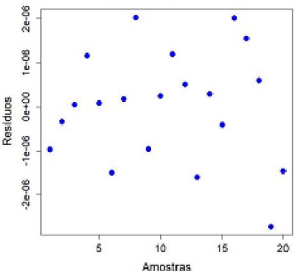
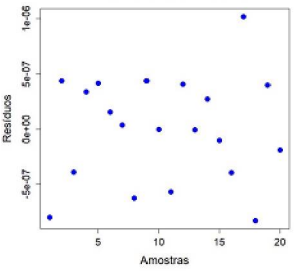
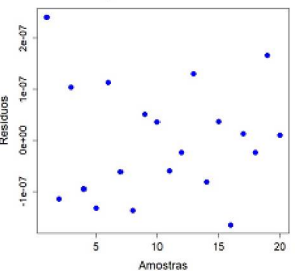
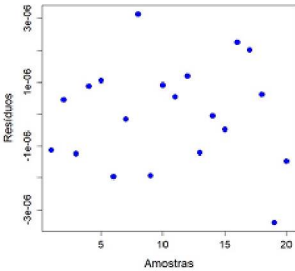
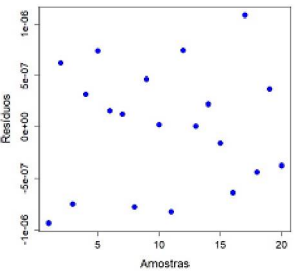
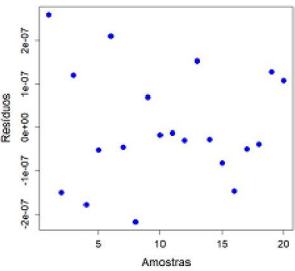
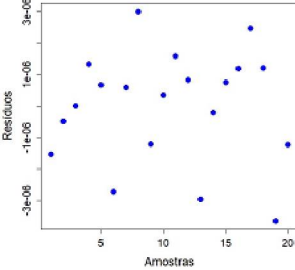
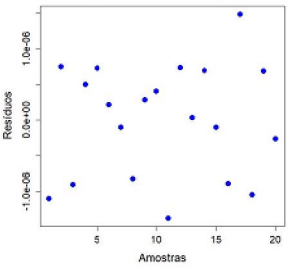
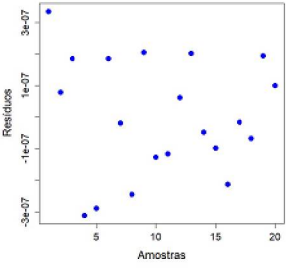
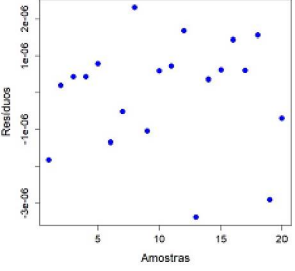
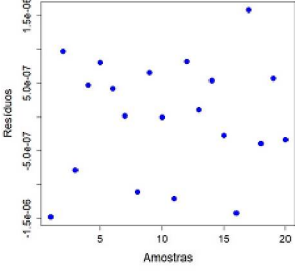
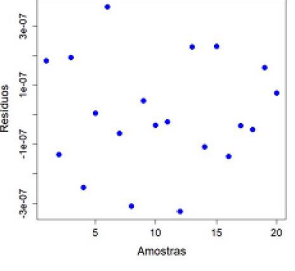
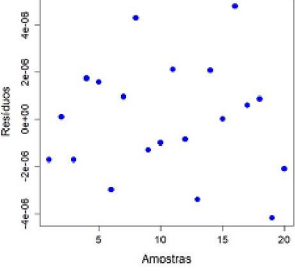
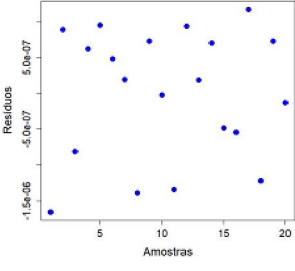
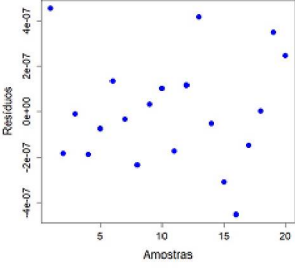
FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE P – INDEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS

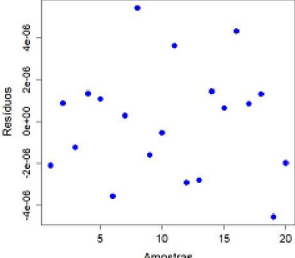
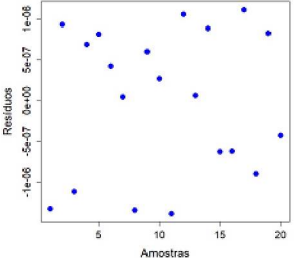
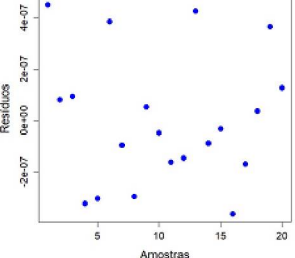
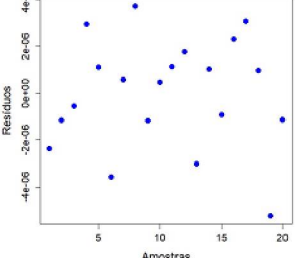
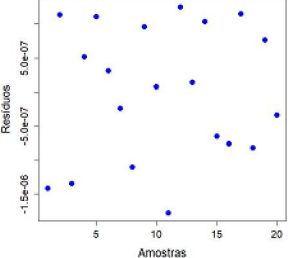
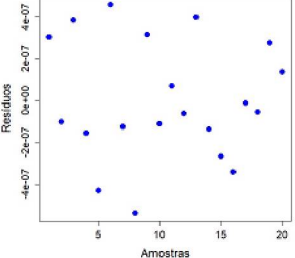
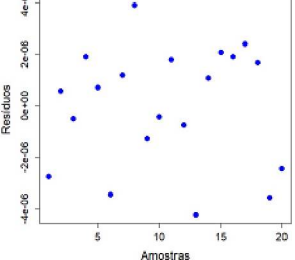
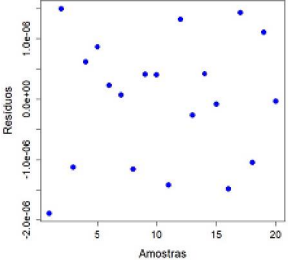
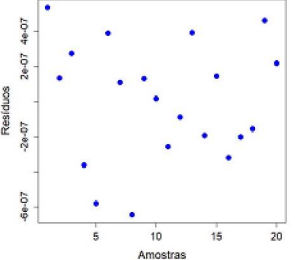
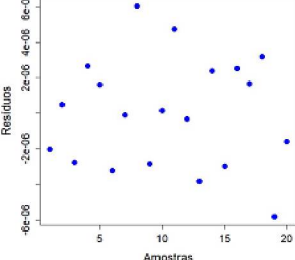
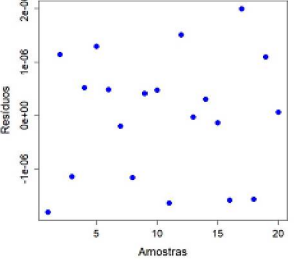
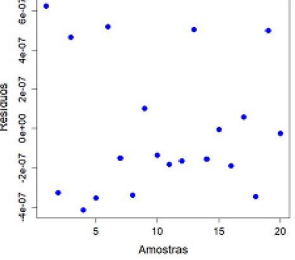
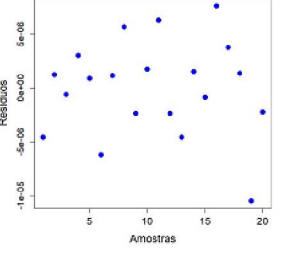
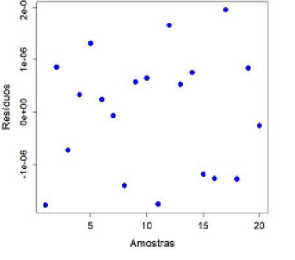
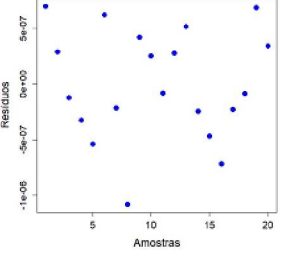
FIGURA 88 – DIAGRAMAS PARA ANÁLISES DAS INDEPENDÊNCIAS DOS RESÍDUOS.  
(continua)



(continuação)

Profundidade	Extensômetro A	Extensômetro B	Extensômetro C
0,30 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,35 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,40 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,45 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,50 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 

(continuação)

Profundidade	Extensômetro A	Extensômetro B	Extensômetro C
0,55 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,60 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,65 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,70 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 
0,75 mm	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 	<p style="text-align: center;">Independência dos Resíduos</p> 

(conclusão)

Profundidade	Extensômetro A	Extensômetro B	Extensômetro C
0,80 mm	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>
0,85 mm	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>
0,90 mm	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>
0,95 mm	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>
1,00 mm	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>	<p>Independência dos Resíduos</p>

FONTE: O autor (2020).

## APÊNDICE Q – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS TRATAMENTOS

TABELA 48 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 1

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
ε <sub>A</sub>	-2.608E-06	-5.896E-06	-9.585E-06	-1.383E-05	-1.860E-05
ε <sub>B</sub>	-5.275E-07	-1.277E-06	-2.150E-06	-3.055E-06	-3.997E-06
ε <sub>C</sub>	3.643E-07	7.646E-07	1.205E-06	1.649E-06	2.209E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
ε <sub>A</sub>	-2.284E-05	-2.724E-05	-3.211E-05	-3.633E-05	-4.053E-05
ε <sub>B</sub>	-4.942E-06	-5.878E-06	-6.617E-06	-7.332E-06	-7.921E-06
ε <sub>C</sub>	2.776E-06	3.440E-06	4.119E-06	4.763E-06	5.598E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
ε <sub>A</sub>	-4.410E-05	-4.831E-05	-5.206E-05	-5.658E-05	-5.874E-05
ε <sub>B</sub>	-8.525E-06	-8.861E-06	-9.292E-06	-9.463E-06	-9.615E-06
ε <sub>C</sub>	6.435E-06	7.047E-06	7.997E-06	8.719E-06	9.511E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
ε <sub>A</sub>	-6.260E-05	-6.316E-05	-6.848E-05	-6.910E-05	-7.164E-05
ε <sub>B</sub>	-9.691E-06	-1.081E-05	-1.132E-05	-1.056E-05	-1.221E-05
ε <sub>C</sub>	1.050E-05	1.121E-05	1.222E-05	1.138E-05	1.266E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 49 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 1

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
ε <sub>A</sub>	1.312E-07	1.946E-07	4.626E-07	8.817E-07	1.178E-06
ε <sub>B</sub>	7.445E-08	1.696E-07	3.012E-07	4.091E-07	5.707E-07
ε <sub>C</sub>	1.556E-08	3.325E-08	3.616E-08	8.986E-08	1.284E-07
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
ε <sub>A</sub>	7.758E-07	1.107E-06	1.095E-06	1.050E-06	1.694E-06
ε <sub>B</sub>	5.666E-07	7.846E-07	9.135E-07	1.072E-06	1.168E-06
ε <sub>C</sub>	1.649E-07	1.858E-07	2.882E-07	1.934E-07	2.650E-07
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
ε <sub>A</sub>	1.539E-06	2.065E-06	1.746E-06	2.324E-06	2.860E-06
ε <sub>B</sub>	1.119E-06	1.282E-06	1.432E-06	1.399E-06	1.250E-06
ε <sub>C</sub>	3.219E-07	3.382E-07	4.601E-07	5.021E-07	4.951E-07
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
ε <sub>A</sub>	3.287E-06	4.974E-06	9.183E-06	8.718E-06	1.180E-05
ε <sub>B</sub>	1.661E-06	2.098E-06	2.418E-06	1.913E-06	3.237E-06
ε <sub>C</sub>	9.821E-07	2.287E-06	2.380E-06	3.239E-06	4.469E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 50 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 2

(continuação)

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
ε <sub>A</sub>	-3.054E-06	-6.844E-06	-1.110E-05	-1.599E-05	-2.125E-05
ε <sub>B</sub>	-6.024E-07	-1.435E-06	-2.428E-06	-3.477E-06	-4.466E-06
ε <sub>C</sub>	3.009E-07	6.065E-07	9.241E-07	1.295E-06	1.678E-06

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-2.616E-05	-3.167E-05	-3.740E-05	-4.179E-05	-4.701E-05
$\epsilon_B$	-5.545E-06	-6.524E-06	-7.334E-06	-8.252E-06	-8.768E-06
$\epsilon_C$	2.187E-06	2.716E-06	3.264E-06	3.920E-06	4.515E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-5.192E-05	-5.566E-05	-5.975E-05	-6.563E-05	-6.833E-05
$\epsilon_B$	-9.418E-06	-9.827E-06	-1.015E-05	-1.040E-05	-1.057E-05
$\epsilon_C$	5.243E-06	6.033E-06	6.777E-06	7.492E-06	8.458E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-7.042E-05	-7.342E-05	-7.308E-05	-7.808E-05	-7.796E-05
$\epsilon_B$	-1.120E-05	-1.162E-05	-1.380E-05	-1.239E-05	-1.246E-05
$\epsilon_C$	8.498E-06	1.000E-05	8.735E-06	7.976E-06	9.322E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 51 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 2

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	1.666E-07	3.859E-07	6.232E-07	7.652E-07	1.173E-06
$\epsilon_B$	4.472E-08	1.126E-07	2.031E-07	2.448E-07	3.260E-07
$\epsilon_C$	1.539E-08	3.775E-08	6.253E-08	6.803E-08	1.172E-07
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	1.353E-06	2.137E-06	2.142E-06	1.487E-06	2.793E-06
$\epsilon_B$	3.915E-07	4.630E-07	4.921E-07	6.729E-07	8.261E-07
$\epsilon_C$	9.936E-08	1.573E-07	1.960E-07	2.425E-07	1.469E-07
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	3.346E-06	2.666E-06	2.752E-06	3.706E-06	4.500E-06
$\epsilon_B$	7.778E-07	7.548E-07	6.560E-07	7.113E-07	8.392E-07
$\epsilon_C$	2.498E-07	3.949E-07	3.850E-07	3.294E-07	6.784E-07
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	5.999E-06	5.212E-06	2.892E-06	9.675E-06	1.116E-05
$\epsilon_B$	1.189E-06	1.936E-06	6.050E-06	3.009E-06	2.559E-06
$\epsilon_C$	9.080E-07	3.988E-06	2.986E-06	3.947E-06	2.852E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 52 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 3

(continuação)

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4.327E-06	-9.858E-06	-1.599E-05	-2.257E-05	-2.963E-05
$\epsilon_B$	-1.232E-06	-2.777E-06	-4.652E-06	-6.559E-06	-8.322E-06
$\epsilon_C$	3.553E-07	7.229E-07	1.131E-06	1.593E-06	2.092E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3.715E-05	-4.464E-05	-5.065E-05	-5.744E-05	-6.453E-05
$\epsilon_B$	-1.018E-05	-1.191E-05	-1.352E-05	-1.500E-05	-1.634E-05
$\epsilon_C$	2.761E-06	3.506E-06	4.291E-06	5.162E-06	5.943E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7.093E-05	-7.770E-05	-8.230E-05	-8.756E-05	-9.190E-05
$\epsilon_B$	-1.738E-05	-1.835E-05	-1.862E-05	-1.937E-05	-2.035E-05
$\epsilon_C$	6.919E-06	8.027E-06	9.091E-06	1.003E-05	1.109E-05

(conclusão)

Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-9.508E-05	-9.930E-05	-1.018E-04	-1.085E-04	-1.117E-04
$\epsilon_B$	-2.144E-05	-2.394E-05	-2.705E-05	-3.133E-05	-2.978E-05
$\epsilon_C$	1.171E-05	1.302E-05	1.347E-05	1.509E-05	1.576E-05

FONTE: O autor (2020).

TABELA 53 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 3

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	1.540E-07	2.581E-07	3.871E-07	7.708E-07	9.893E-07
$\epsilon_B$	5.535E-08	1.860E-07	2.874E-07	3.058E-07	4.226E-07
$\epsilon_C$	1.140E-08	1.838E-08	2.965E-08	4.019E-08	8.456E-08
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	1.057E-06	9.174E-07	1.774E-06	1.952E-06	2.298E-06
$\epsilon_B$	3.801E-07	5.714E-07	8.515E-07	7.898E-07	9.248E-07
$\epsilon_C$	8.567E-08	8.967E-08	1.324E-07	2.373E-07	2.802E-07
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	2.823E-06	1.959E-06	2.605E-06	3.599E-06	4.156E-06
$\epsilon_B$	1.026E-06	1.243E-06	9.984E-07	1.126E-06	1.424E-06
$\epsilon_C$	2.432E-07	2.525E-07	2.677E-07	2.905E-07	3.974E-07
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	5.786E-06	6.780E-06	7.154E-06	1.214E-05	1.395E-05
$\epsilon_B$	1.550E-06	3.490E-06	8.025E-06	1.425E-05	9.250E-06
$\epsilon_C$	6.360E-07	6.010E-07	1.029E-06	1.615E-06	2.306E-06

FONTE: O autor (2020).

TABELA 54 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES DO CASO 4

Profundidade de perfuração	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$\epsilon_A$	-4.640E-06	-1.044E-05	-1.696E-05	-2.433E-05	-3.161E-05
$\epsilon_B$	-1.239E-06	-2.864E-06	-4.688E-06	-6.699E-06	-8.611E-06
$\epsilon_C$	2.984E-07	5.772E-07	8.817E-07	1.243E-06	1.712E-06
Profundidade de perfuração	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$\epsilon_A$	-3.892E-05	-4.666E-05	-5.488E-05	-6.261E-05	-6.876E-05
$\epsilon_B$	-1.048E-05	-1.207E-05	-1.391E-05	-1.536E-05	-1.682E-05
$\epsilon_C$	2.247E-06	2.877E-06	3.573E-06	4.352E-06	5.185E-06
Profundidade de perfuração	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\epsilon_A$	-7.569E-05	-8.148E-05	-8.842E-05	-9.510E-05	-9.838E-05
$\epsilon_B$	-1.783E-05	-1.887E-05	-2.009E-05	-2.043E-05	-2.084E-05
$\epsilon_C$	6.053E-06	7.069E-06	8.019E-06	9.065E-06	9.925E-06
Profundidade de perfuração	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\epsilon_A$	-1.022E-04	-1.061E-04	-1.106E-04	-1.144E-04	-1.176E-04
$\epsilon_B$	-2.167E-05	-2.264E-05	-2.314E-05	-2.145E-05	-2.162E-05
$\epsilon_C$	1.072E-05	1.164E-05	1.191E-05	1.262E-05	1.284E-05

FONTE: O autor (2020).

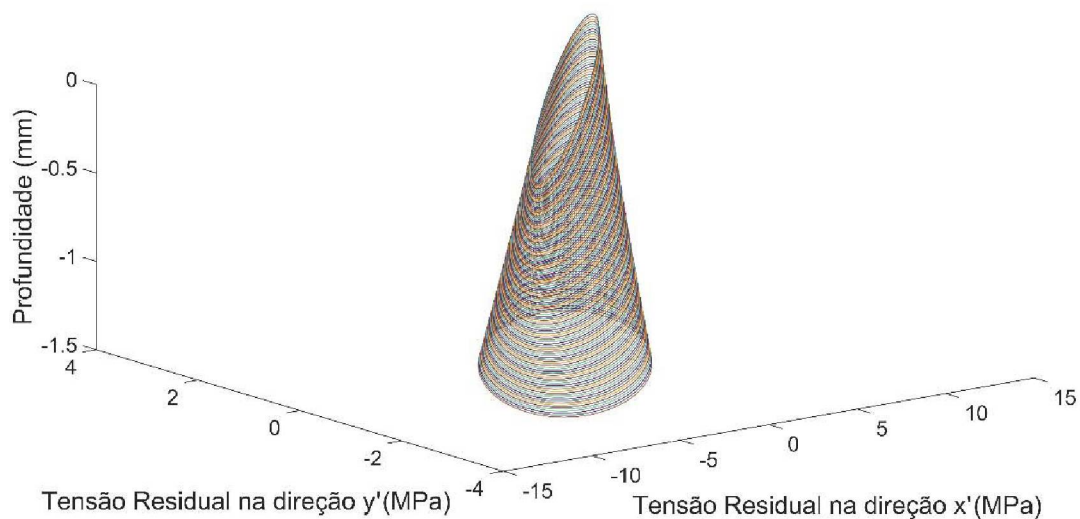
TABELA 55 – DESVIO PADRÃO DAS MEDIÇÕES DO CASO 4

<b>Profundidade de perfuração</b>	<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,15</b>	<b>0,20</b>	<b>0,25</b>
$\epsilon_A$	2.204E-07	4.239E-07	7.912E-07	8.704E-07	1.226E-06
$\epsilon_B$	7.571E-08	1.671E-07	2.412E-07	3.922E-07	5.513E-07
$\epsilon_C$	1.152E-08	2.550E-08	3.543E-08	6.028E-08	8.257E-08
<b>Profundidade de perfuração</b>	<b>0,30</b>	<b>0,35</b>	<b>0,40</b>	<b>0,45</b>	<b>0,50</b>
$\epsilon_A$	2.020E-06	2.409E-06	2.434E-06	1.863E-06	3.392E-06
$\epsilon_B$	7.219E-07	7.160E-07	1.072E-06	1.129E-06	9.603E-07
$\epsilon_C$	1.182E-07	1.156E-07	1.560E-07	1.178E-07	3.185E-07
<b>Profundidade de perfuração</b>	<b>0,55</b>	<b>0,60</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,75</b>
$\epsilon_A$	3.370E-06	3.321E-06	2.781E-06	3.723E-06	6.861E-06
$\epsilon_B$	9.052E-07	9.024E-07	1.277E-06	1.593E-06	1.399E-06
$\epsilon_C$	2.785E-07	2.304E-07	3.260E-07	3.186E-07	5.385E-07
<b>Profundidade de perfuração</b>	<b>0,80</b>	<b>0,85</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>1,00</b>
$\epsilon_A$	5.508E-06	5.593E-06	6.151E-06	7.812E-06	9.203E-06
$\epsilon_B$	1.166E-06	1.164E-06	1.029E-06	7.051E-06	7.317E-06
$\epsilon_C$	7.351E-07	1.408E-06	1.643E-06	1.975E-06	2.231E-06

FONTE: O autor (2020).

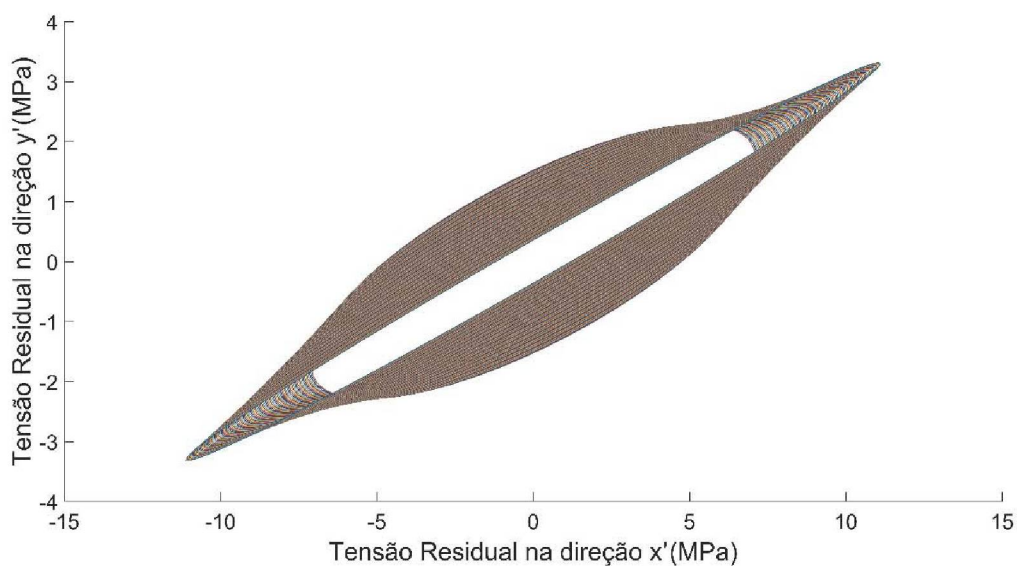
## APÊNDICE R – REPRESENTAÇÃO DO PERFIL DE TENSÕES RESIDUAIS ATRAVÉS DE ELIPSES

FIGURA 89 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



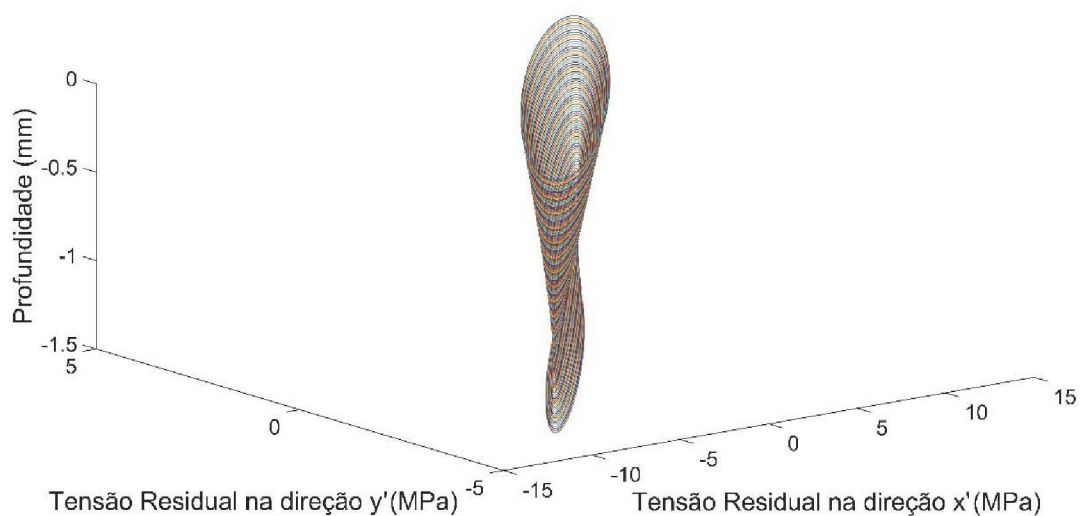
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 90 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



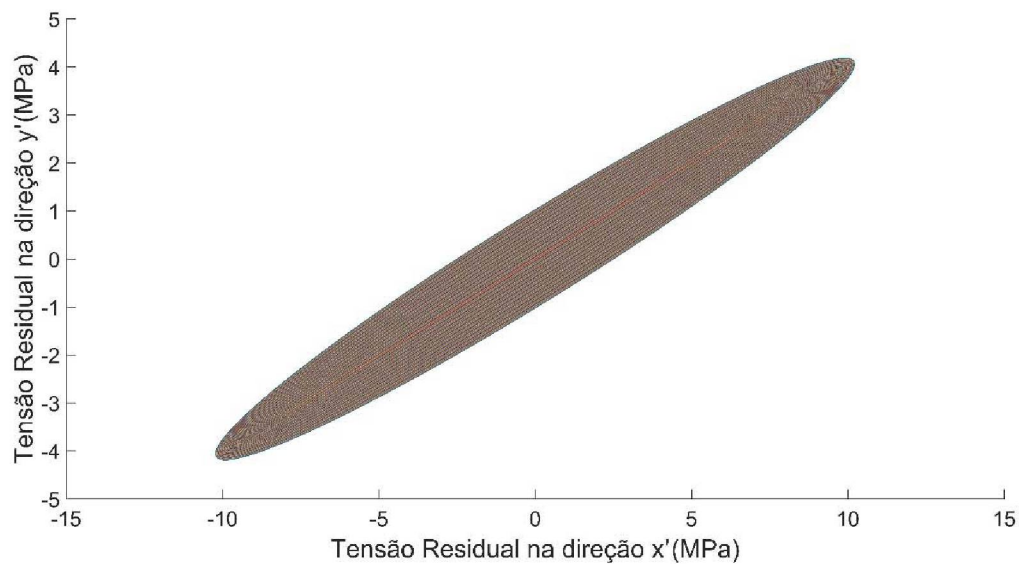
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 91 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



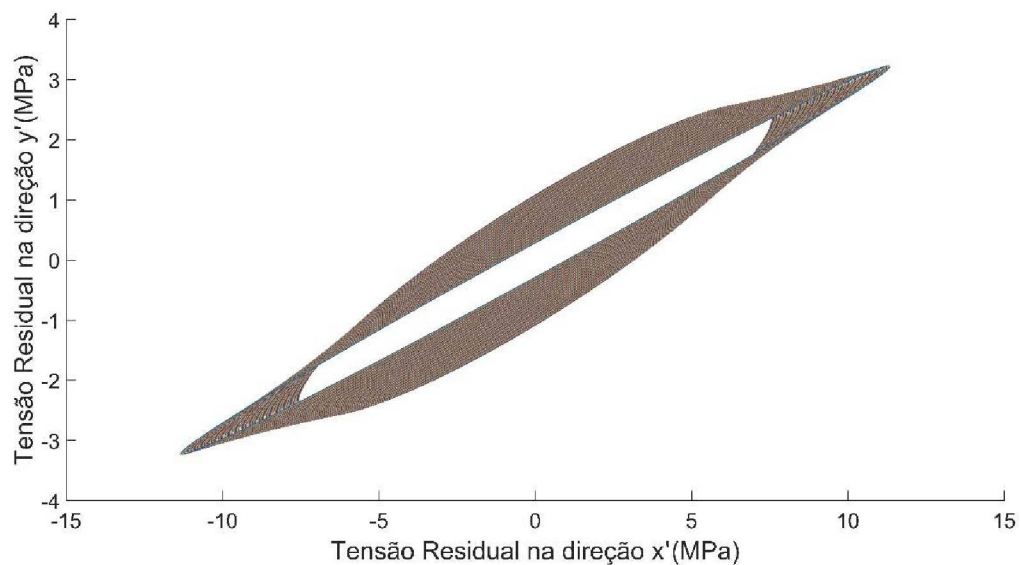
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 92 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



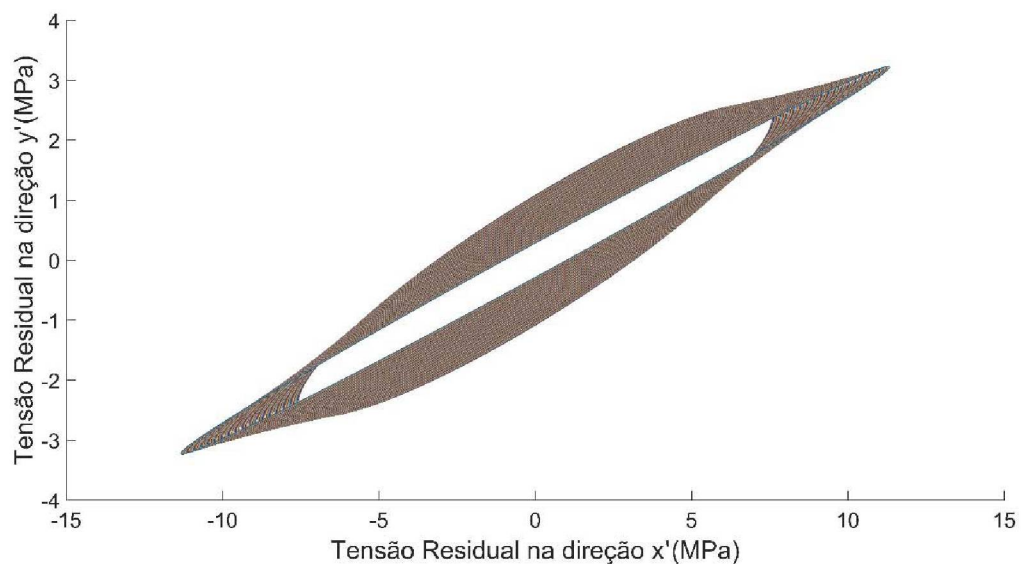
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 93 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



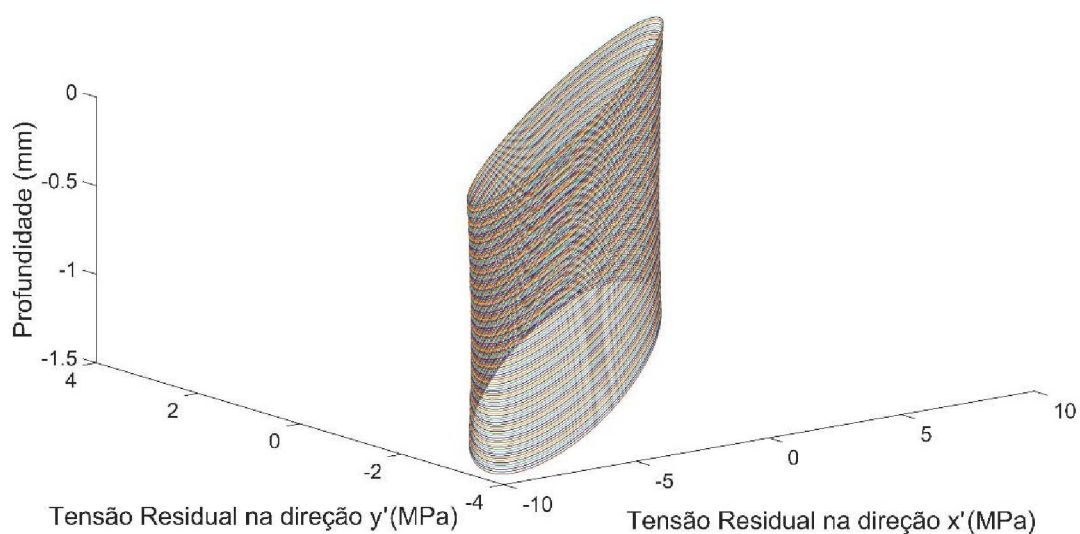
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 94 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS  $X'$  E  $Y'$  NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



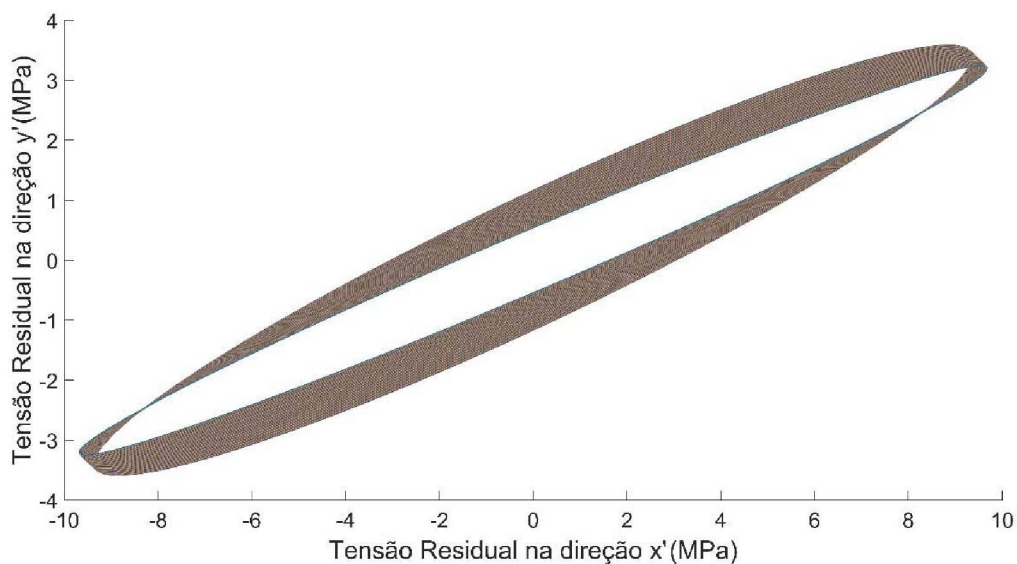
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 95 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



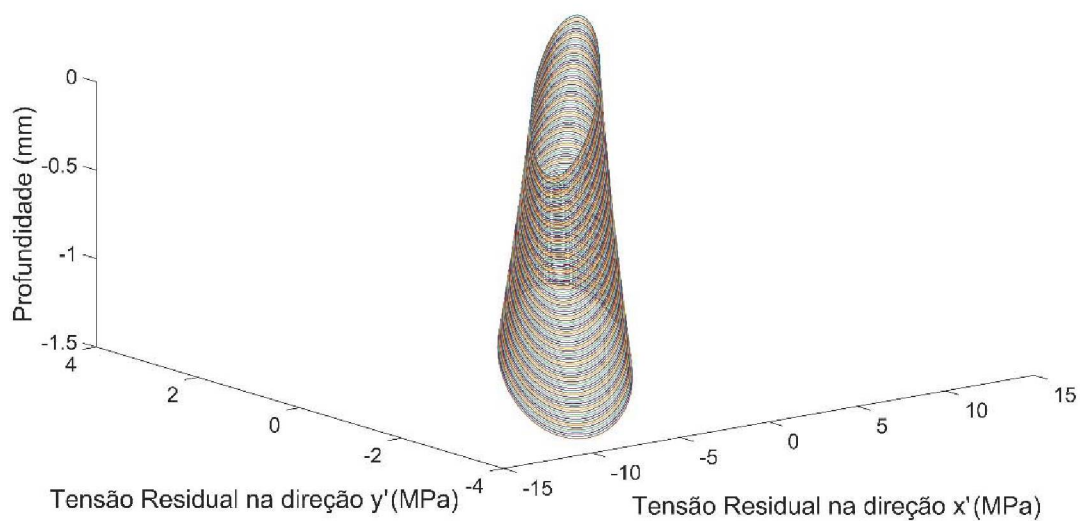
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 96 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



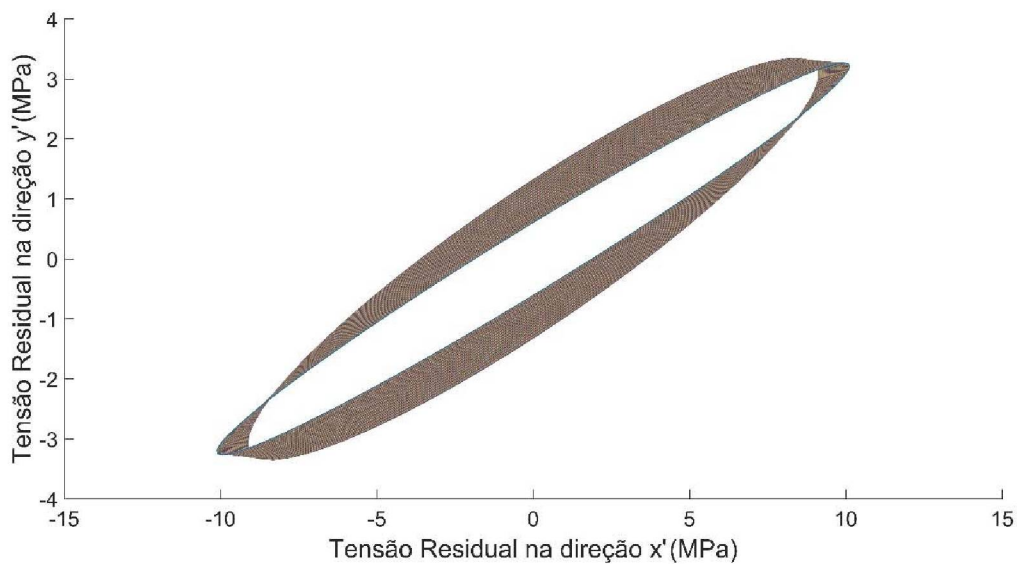
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 97 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



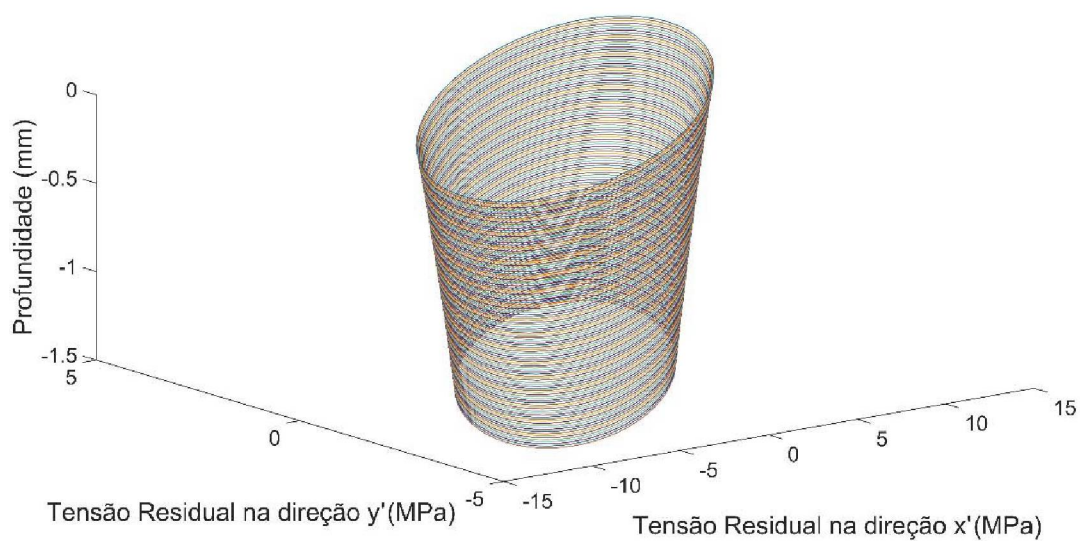
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 98 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



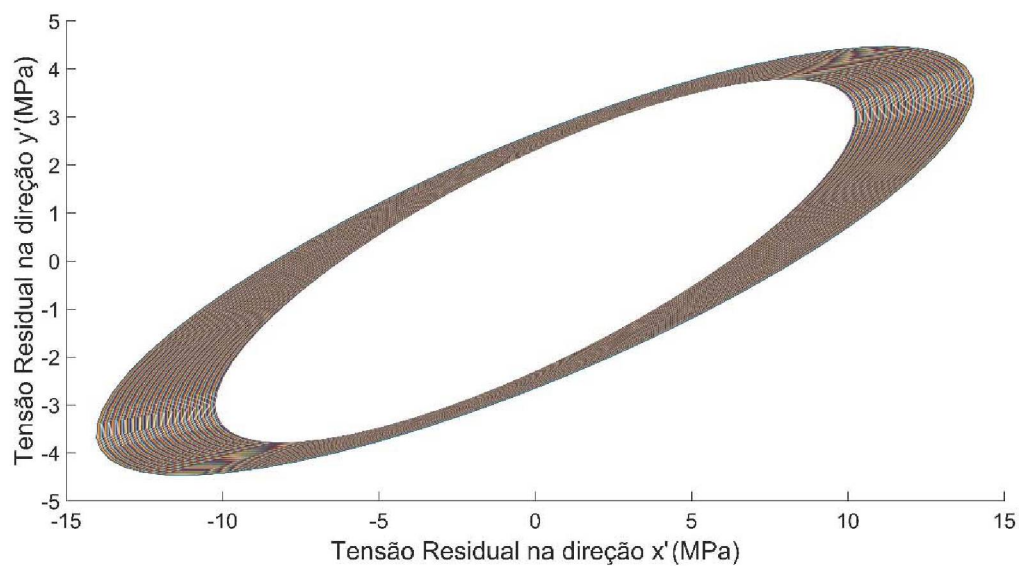
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 99 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



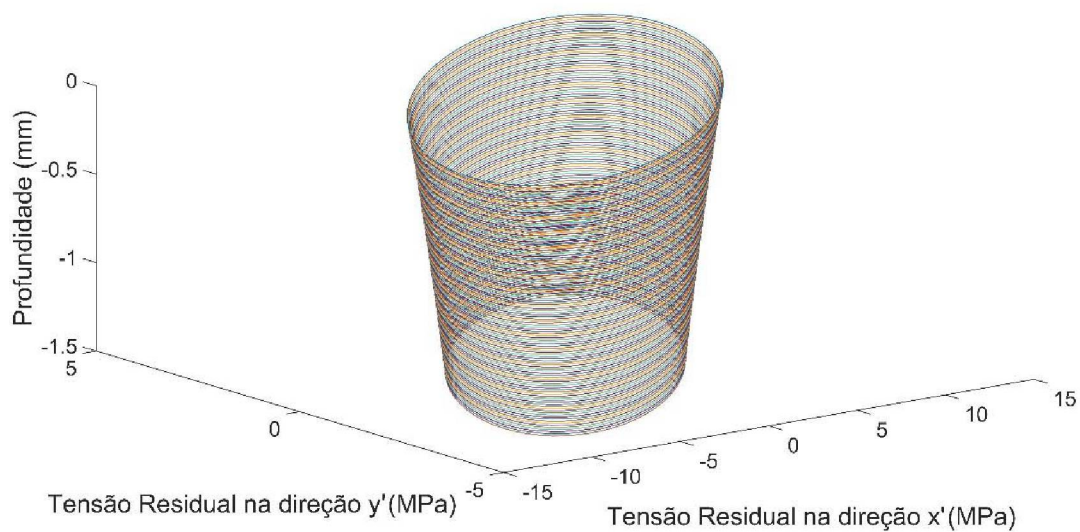
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 100 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



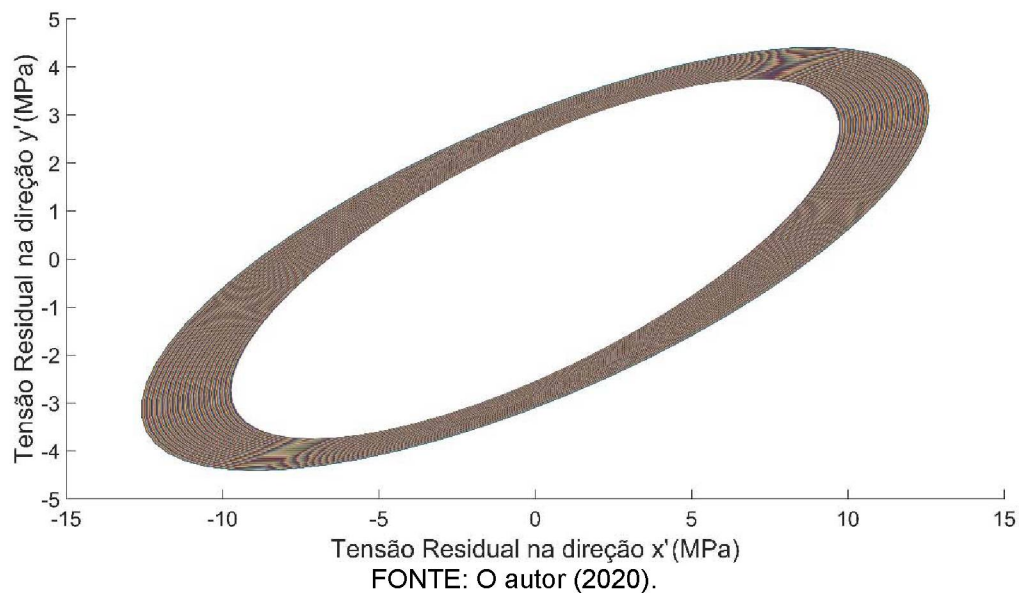
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 101 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



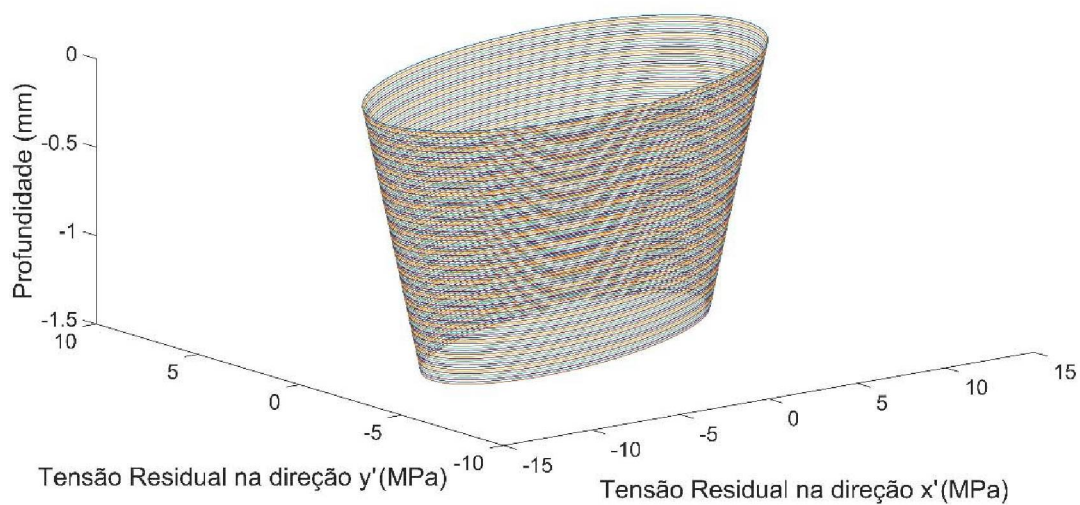
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 102 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



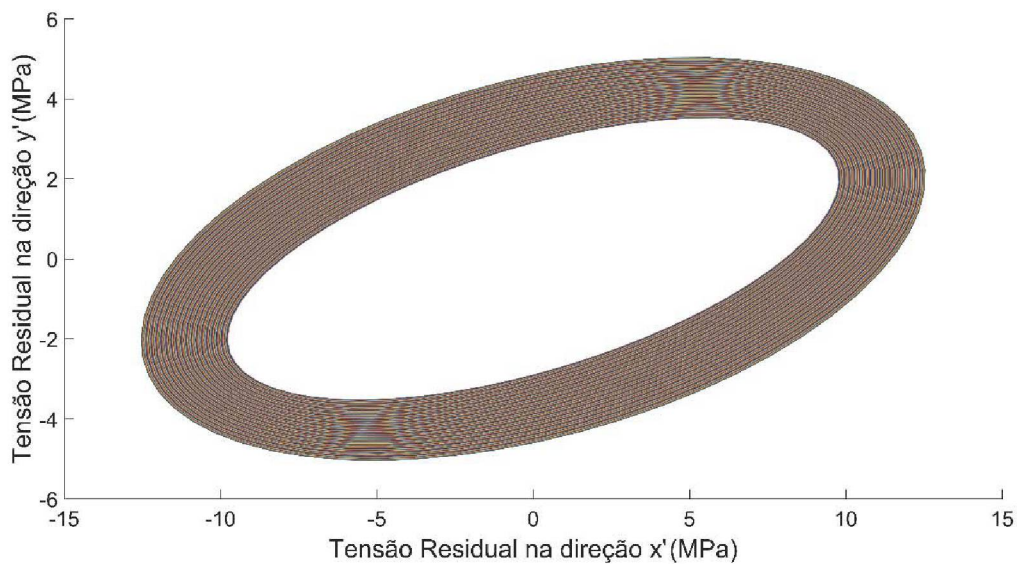
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 103 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



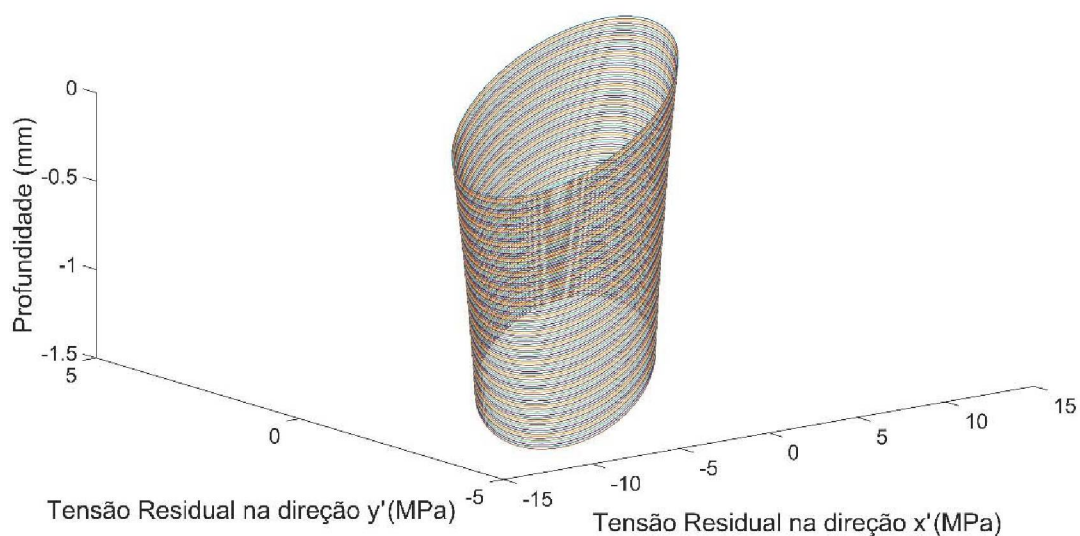
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 104 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



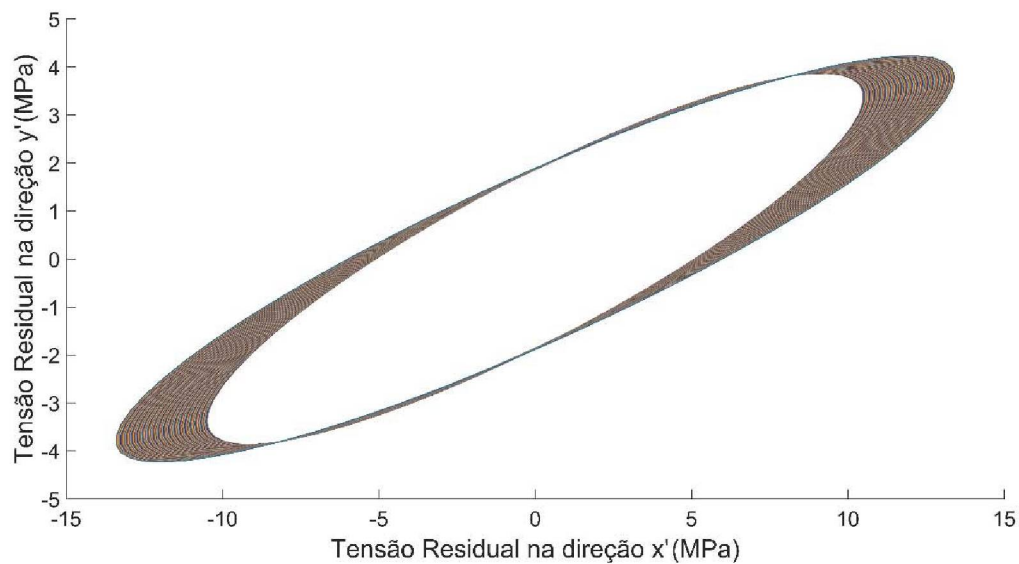
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 105 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



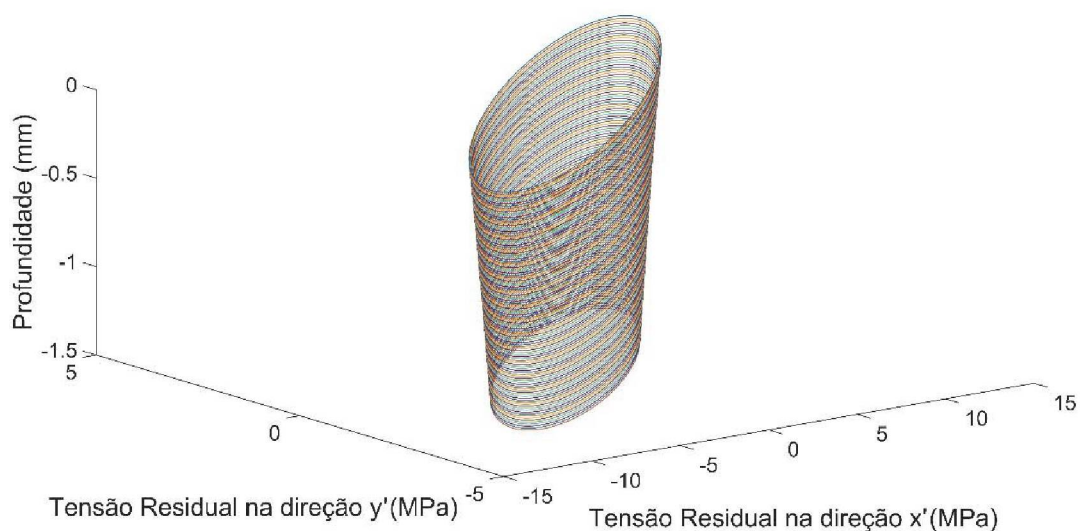
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 106 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



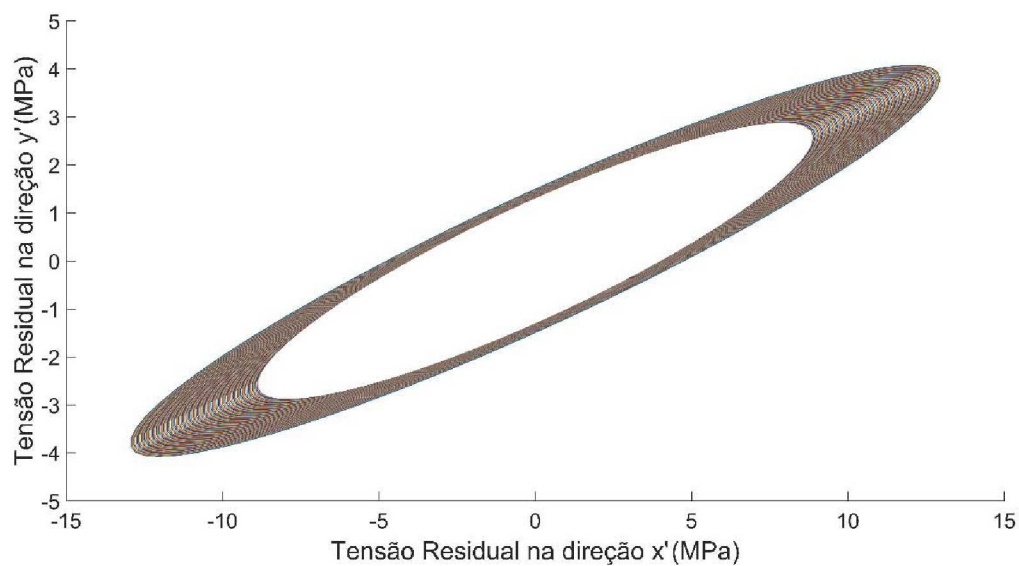
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 107 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



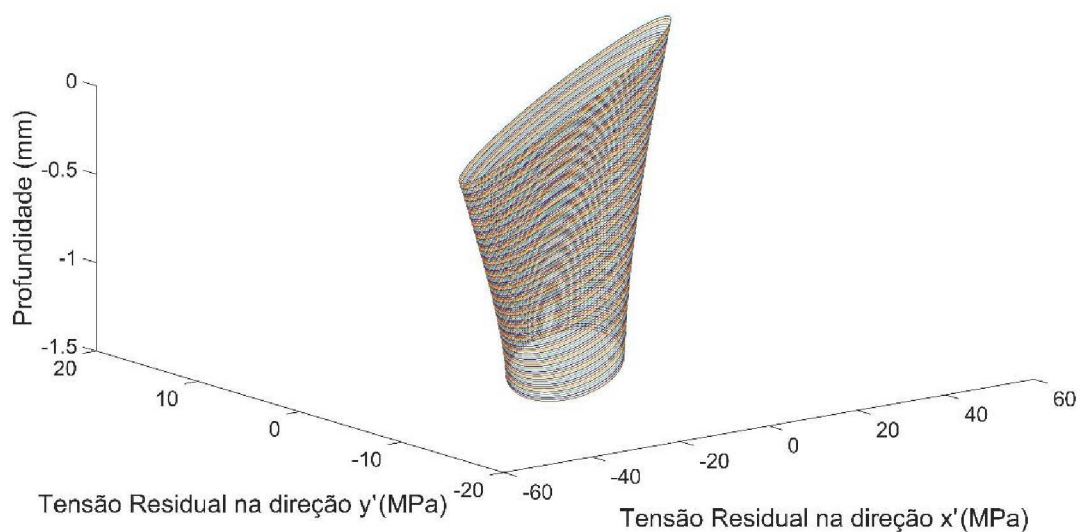
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 108 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE ALUMÍNIO AA-6063 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



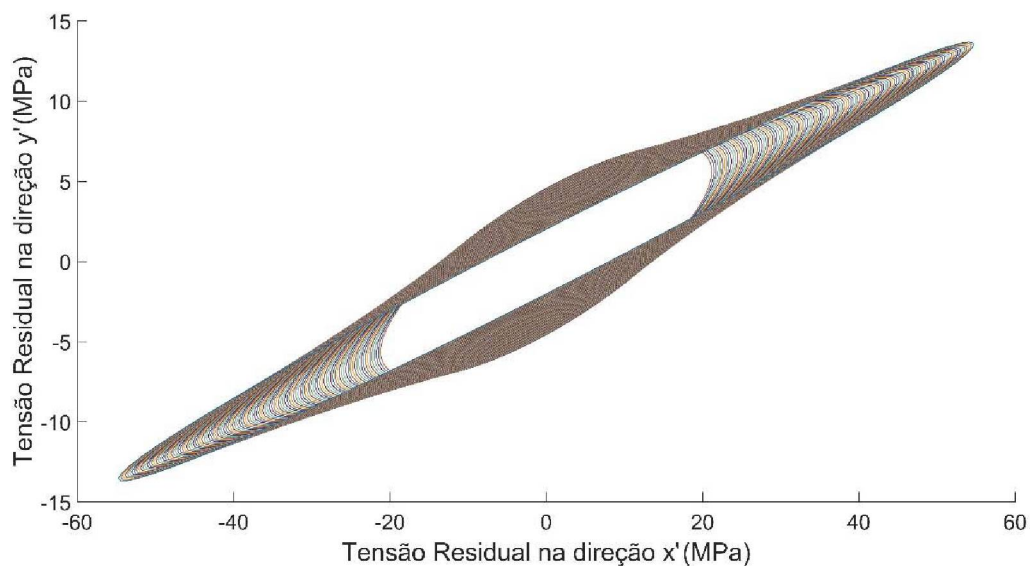
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 109 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



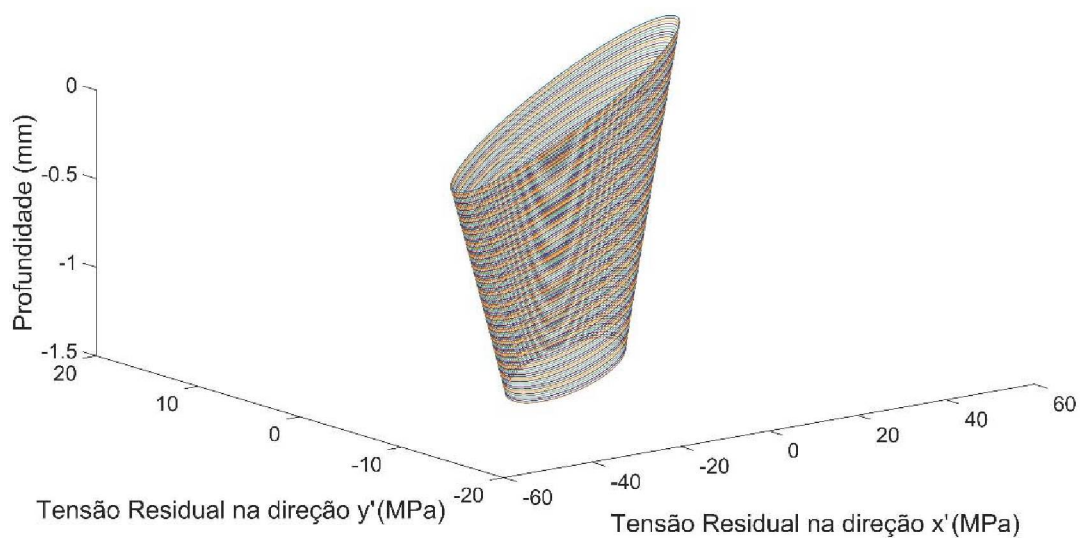
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 110 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



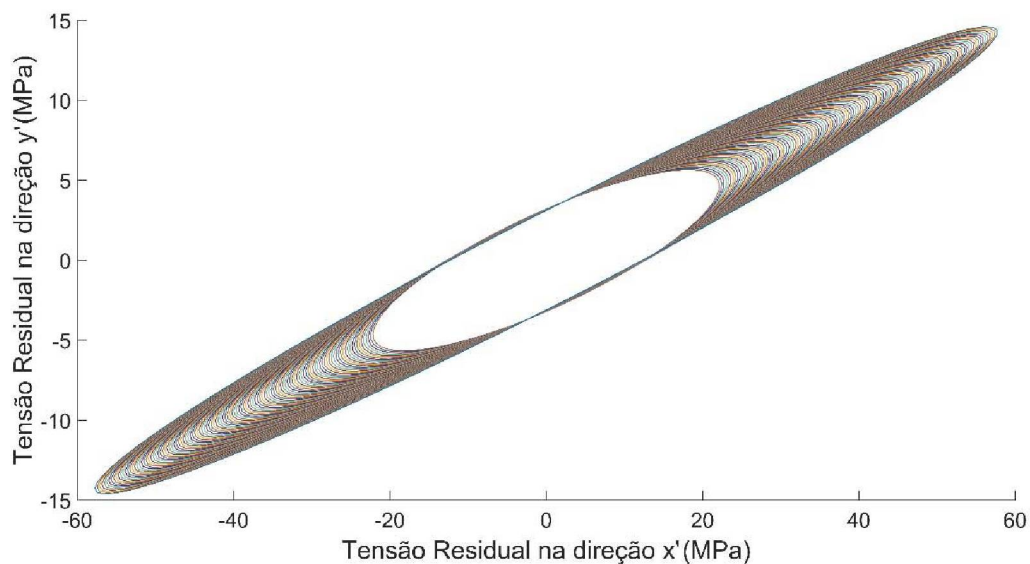
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 111 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



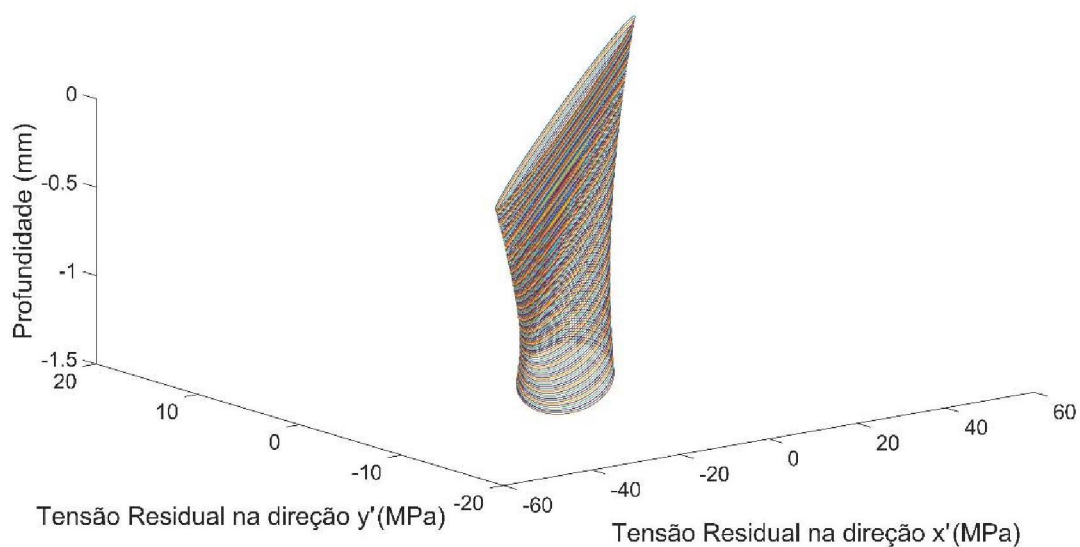
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 112 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



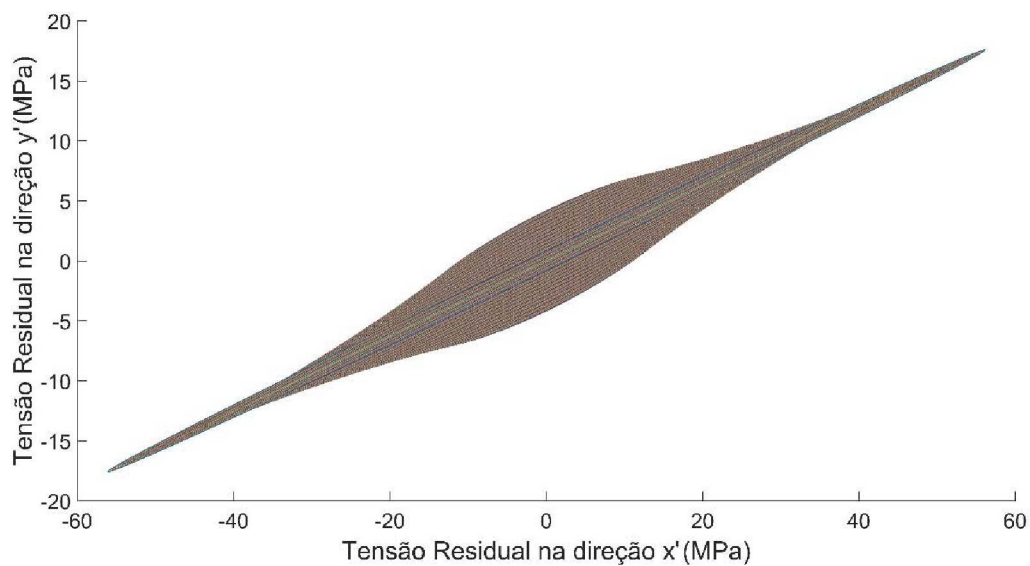
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 113 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



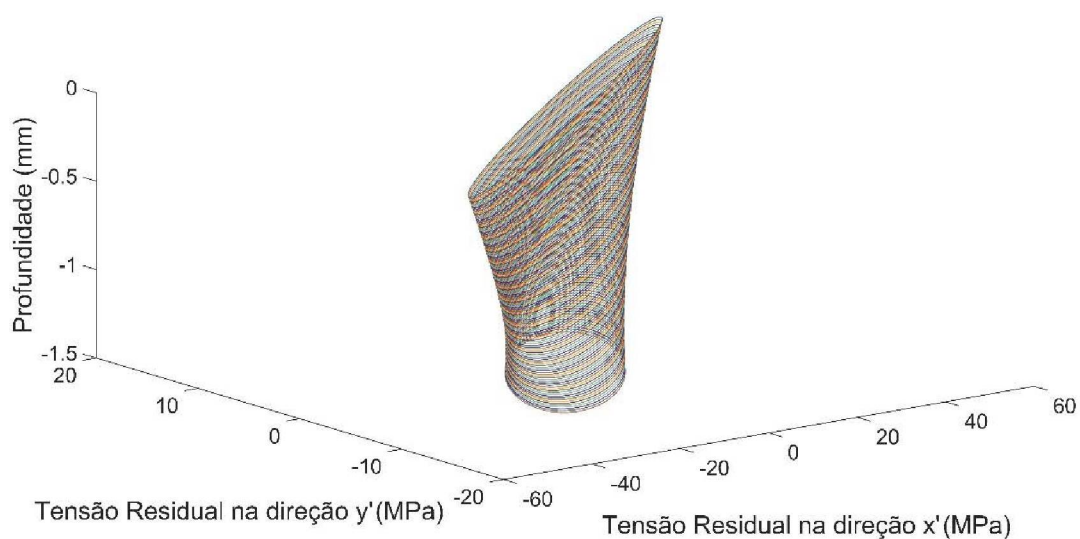
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 114 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



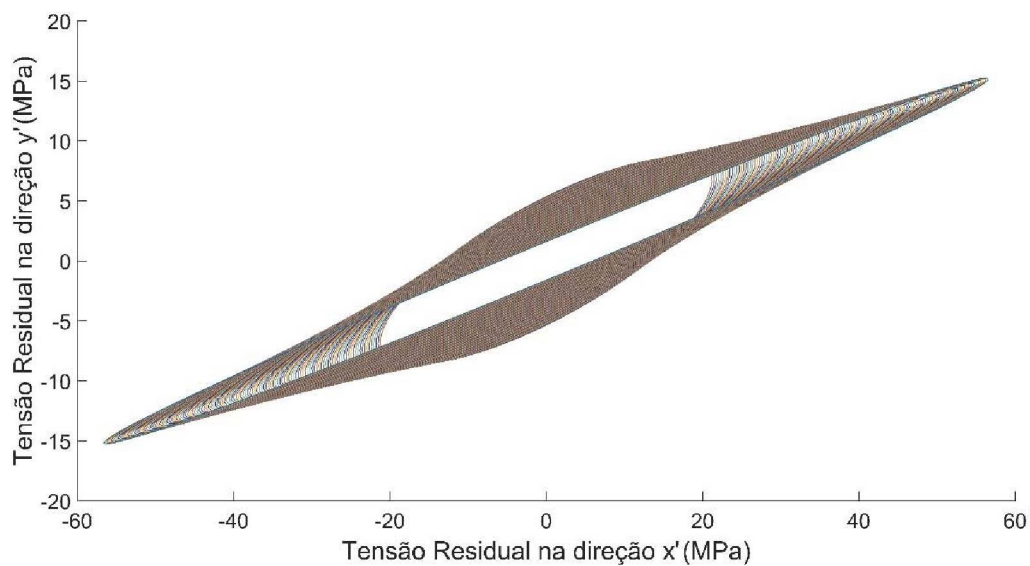
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 115 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



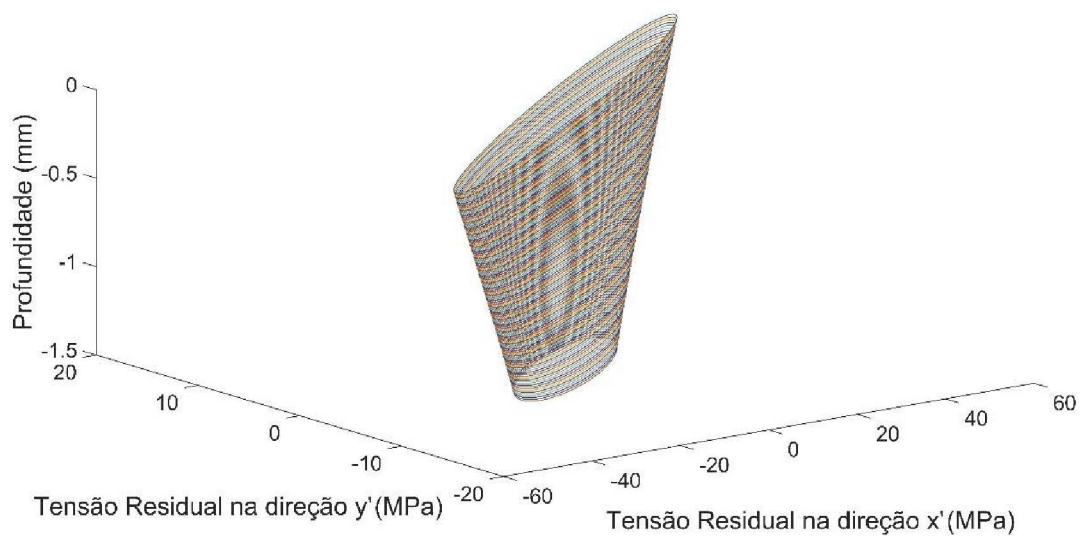
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 116 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



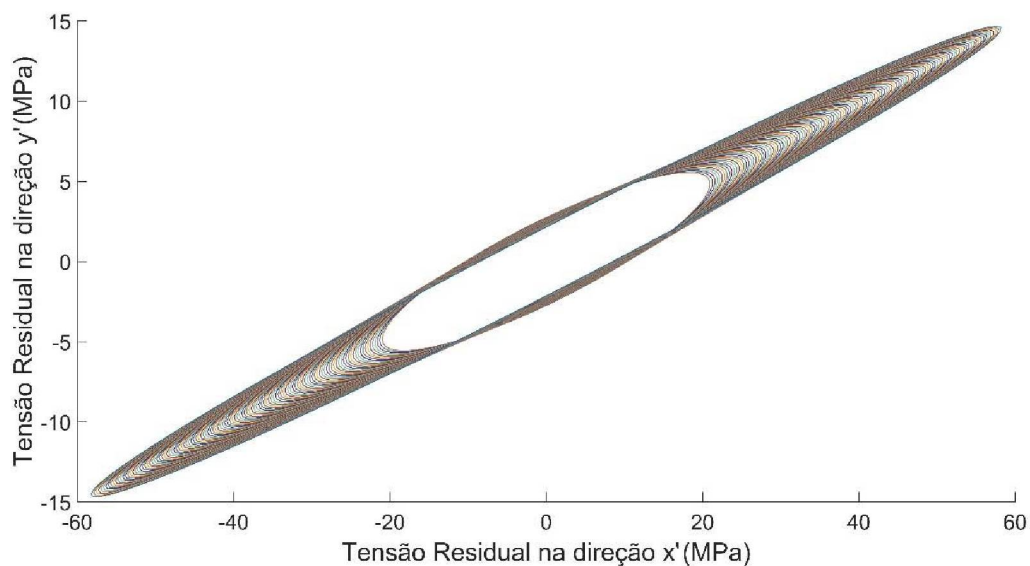
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 117 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



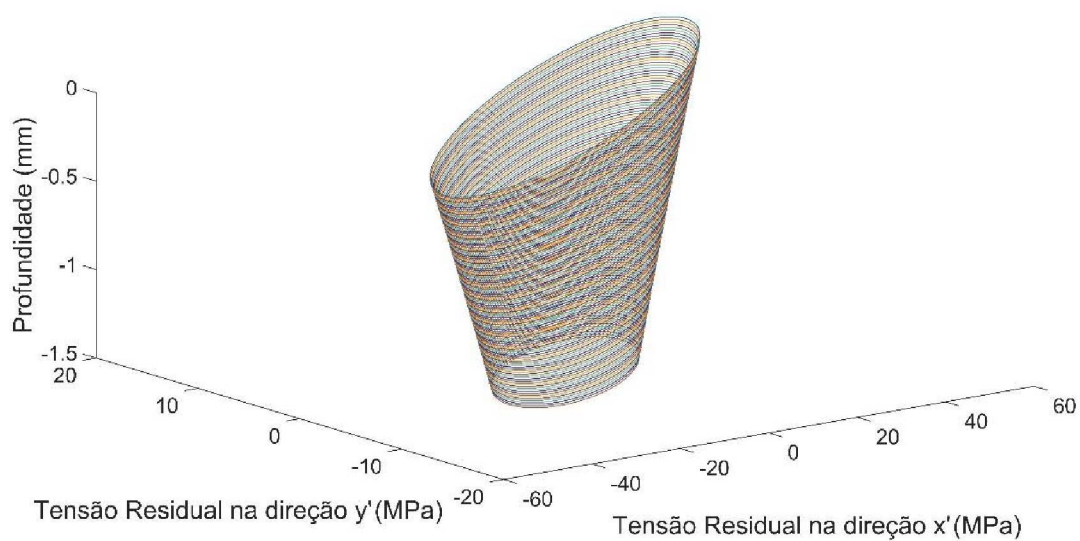
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 118 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 225 MM DA ROSETA.



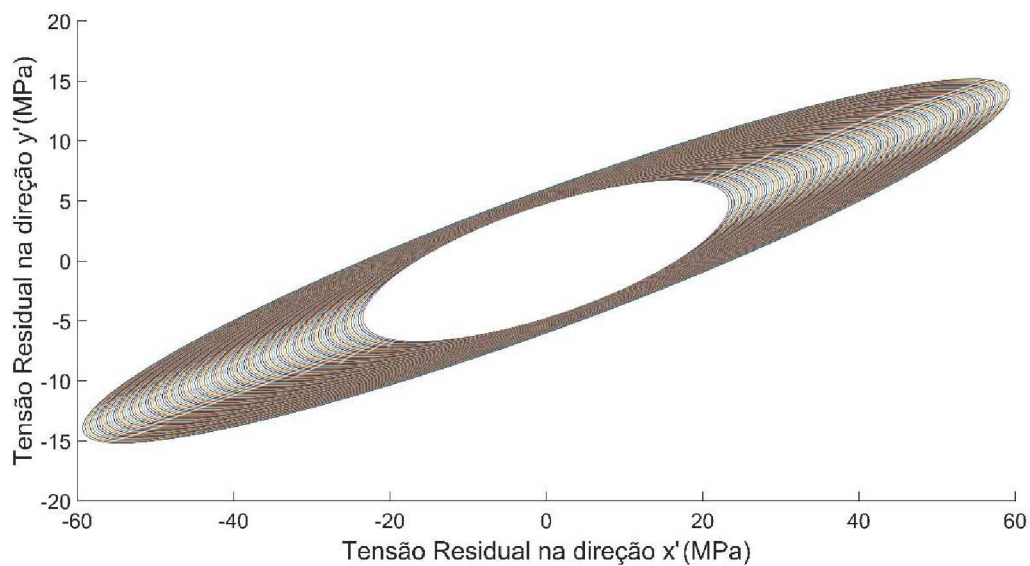
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 119 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



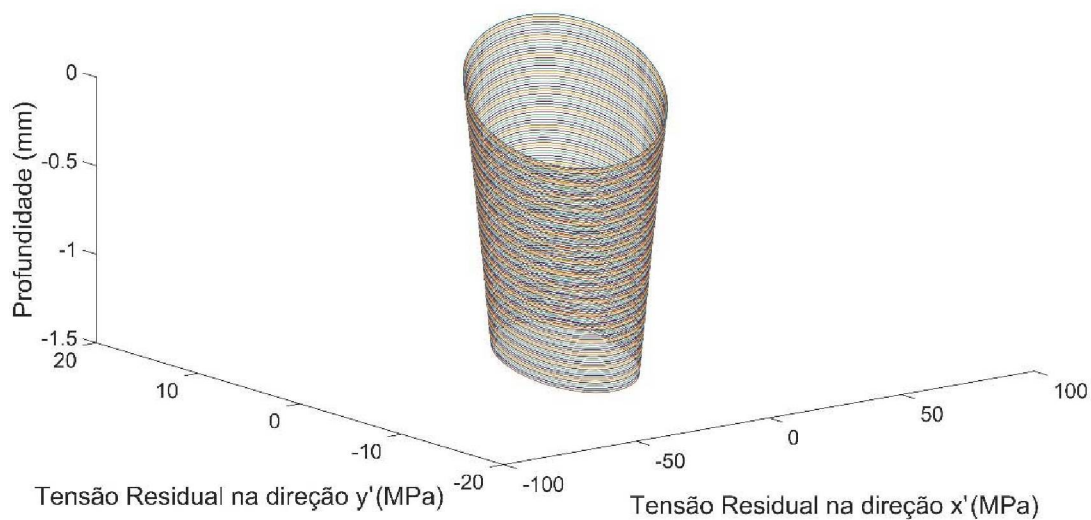
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 120 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO PRIMEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



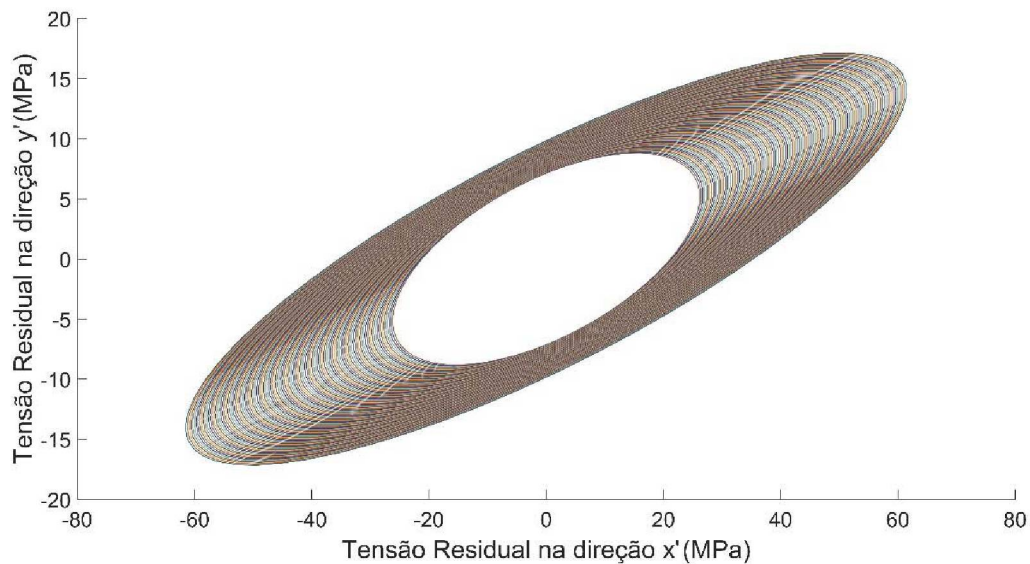
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 121 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



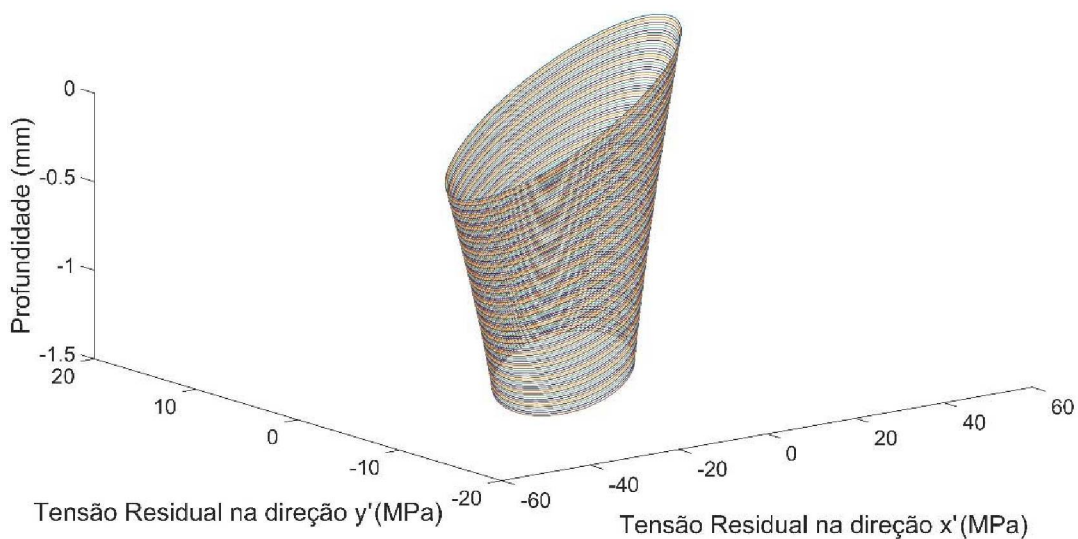
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 122 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO SEGUNDO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



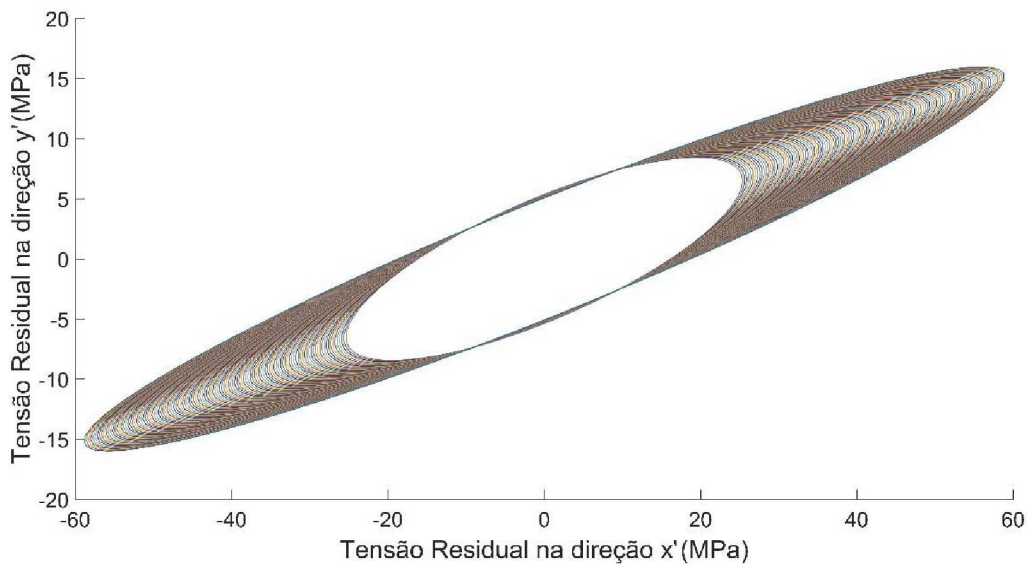
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 123 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



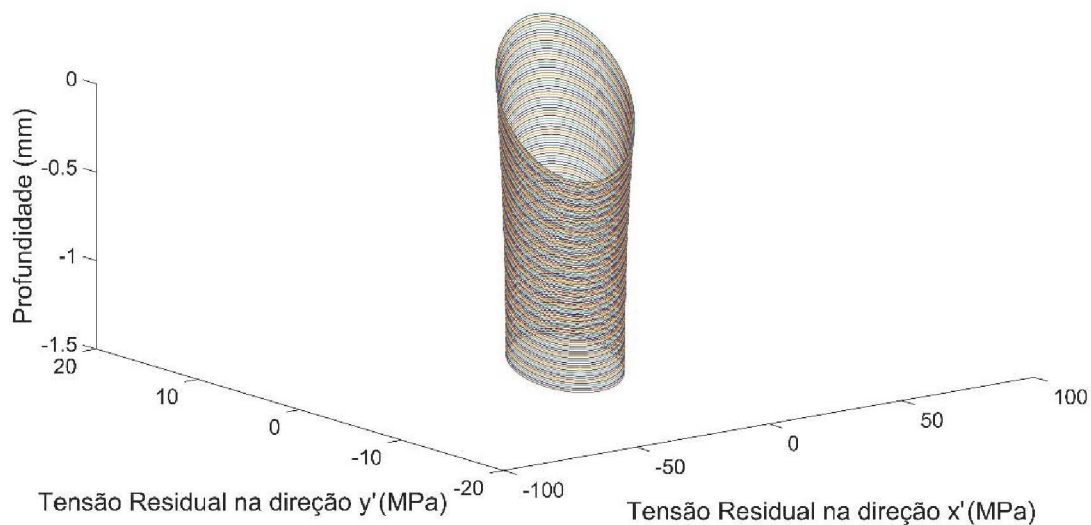
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 124 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO TERCEIRO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



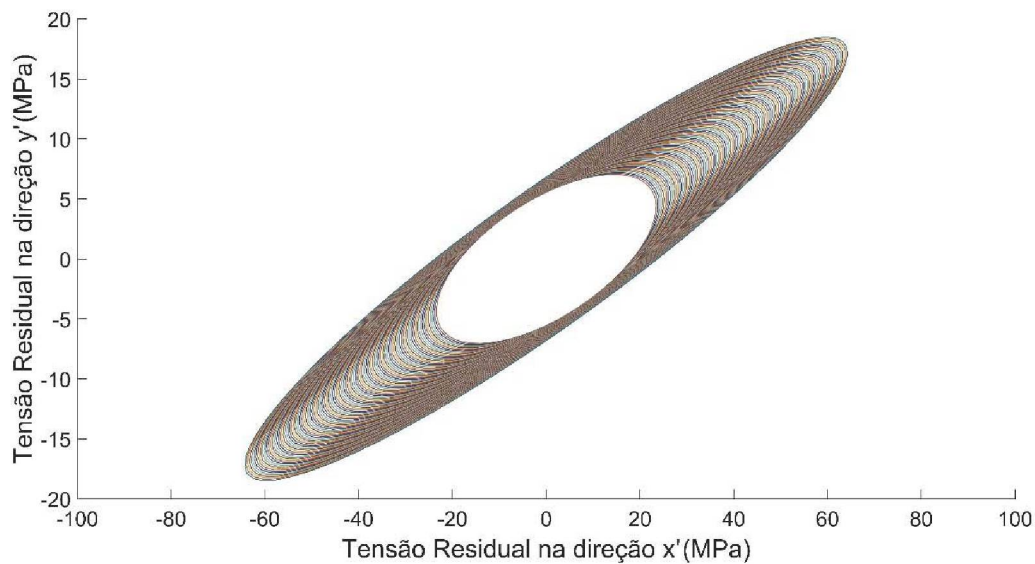
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 125 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



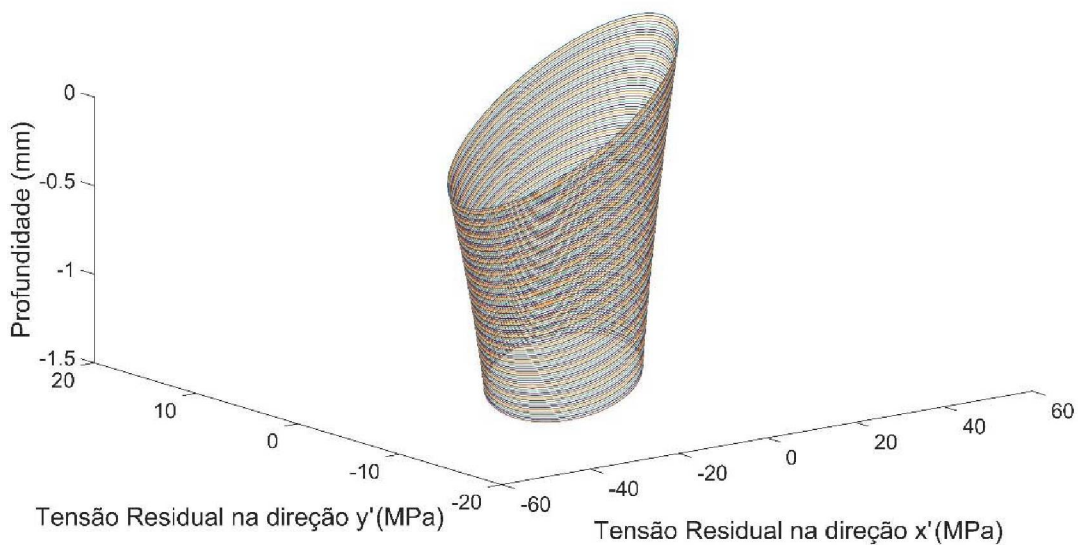
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 126 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUARTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



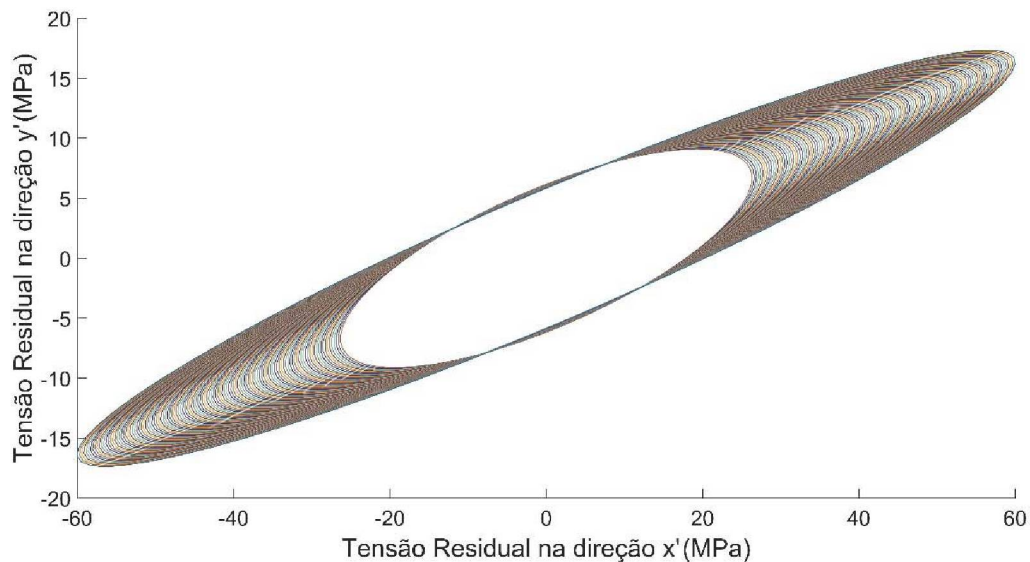
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 127 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 128 - TENSÕES PRINCIPAIS E DIREÇÕES PRINCIPAIS NO PLANO DEFINIDO PELOS EIXOS X' E Y' NO QUINTO EXPERIMENTO PARA O CORPO DE AÇO AISI 1025 COM UMA FORÇA APLICADA A 250 MM DA ROSETA.



FONTE: O autor (2020).