

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

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

PPGEM

COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS
EM ANÉIS PARA ROLAMENTOS

Carlos Otávio Damas Martins

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2004

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

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

PPGEM

COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS
EM ANÉIS PARA ROLAMENTOS.

CARLOS OTÁVIO DAMAS MARTINS

Engenheiro de Materiais

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

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2004

II

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

Orientador: Prof. Dr. Eng. Telmo Roberto Strohaecker, PPGEM–UFRGS, Brasil.

Co-Orientador: Priv–Doz. Dr. Ing. Habil. Thomas K. Hirsch, Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik–IWT–Universidade de Bremen, Alemanha.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Irionson Antônio Bassani – UNISC/RS/Brasil

Prof. Dr. Carlos Eduardo Fortis Kwietniewski – UNISINOS/RS/Brasil

Prof. Dr. Afonso Reguly – UFRGS/RS/Brasil

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira
Coordenador do PPGEM

A Deus,
por sempre estar presente e
por me proporcionar a honra e o prazer
de fazer parte da família Lamefiana...

AGRADECIMENTOS

Aos meus Orientadores, Dr. Telmo R. Strohaecker e Dr. Thomas K. Hirsch, por toda a confiança, dedicação, suporte e ensinamentos transmitidos;

Aos membros da Banca Examinadora por todo o reconhecimento, paciência, compreensão e pelas importantes contribuições que elevaram a qualidade deste trabalho;

A toda a equipe do Laboratório de Metalurgia Física–UFRGS, em especial aos amigos: “Rubão”, “Surfi”, “Bigode”, Sandro, Vitor, “Oswaldão”, “Água”, Gilnei, Jorge, Susi, Dona Neiva, Dona Sofia, “Punkinho”, “Beavis”, Kaspary, Tentardini, “Danlei”, Genaro, “Skate”, “Ed”, “Balucho”, Saulo, Jailson, “Braguinha”, Thomas, Tonilson, Spezia, Lopo, Léoneros, Val, Rosy, Beti, Elisa, Simone, Cíntia, Mariana, Guilherme e “Carioca”;

Agradecimentos especiais aos amigos: M.Sc. André Cervieri e Dr.^a Liane Roldo, por todo o apoio fornecido, principalmente, na edição e conclusão deste trabalho;

A toda equipe técnica do IWT, em especial aos amigos: Timo, Radik, Ronald, Igor, Edu Watjen, Bernd Böltz, Rainer Weinrich, Alexandre Dias, Cornelia Kassner, Elke Deniz e a todo grupo de Metalografia;

Aos doutores Alexandre e Tatiana Rocha por todo o incentivo e apoio fornecido, dentro e fora do laboratório, durante a realização deste trabalho;

Aos pesquisadores Gary Schajer, Hans Kockelmann, Thomas Kleckers, Altair Soria, Ernani Palma, Rubem Sommer, Markus Bruns e Ângela Bauemel por toda ajuda prestada nos momentos difíceis e por me incentivarem a seguir por este caminho da pesquisa;

A todos os funcionários e professores do PPGEM–UFRGS;

Aos Professores Carlos P. Bergmann, Carlos A. Ferreira e Luís F. P. Dick, pela contribuição prestada durante minha formação como engenheiro, sempre lhes serei grato;

Aos amigos Álvaro Meneguzzi, Giovane Gonçalves e Miguel Basso por todos os ensinamentos passados durante meu período como Iniciação Científica;

A todos os colegas e amigos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial para as amigas Taíse Matoso e Annelise Kopp;

À minha família, por toda ajuda, carinho, incentivo e compreensão, não sei se chegaria até aqui sem eles, mas certamente, caso chegasse, isso não valeria nada;

Ao CNPq, Capes e DFG (Alemanha) pelo apoio financeiro.

*“...Quando você tem a chance
de fazer algo especial,
você deve dar tudo de si
para que isso se torne realidade...”*

(Michael Jeffrey Jordan)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO.....	VII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XV
LISTA DE EQUAÇÕES	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XIX
RESUMO	XXII
ABSTRACT	XXIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Justificativa.....	2
1.4 Distribuição do Trabalho	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Tensões Residuais	5
2.1.1 Visão Geral	5
2.1.2 Origens das Tensões Residuais	6
2.1.3 Classificação das Tensões Residuais.....	7
2.1.4 Efeito das Tensões Residuais nos Componentes Mecânicos.....	9
2.1.5 Estabilidade das Tensões Residuais	13
2.1.6 Medida das Tensões Residuais.....	13
2.2 Determinação das Tensões Residuais pelo Método do Furo Cego	16
2.2.1 Histórico e Desenvolvimento	17
2.2.2 Princípios Físicos.....	19
2.2.3 Procedimentos	21
2.2.4 Cálculo das Tensões Residuais.....	24
2.2.5 Outras observações sobre o Método do Furo Cego.....	29
2.3 Determinação das Tensões Residuais pelo Método Micromagnético.....	30
2.3.1 Princípios Físicos.....	30
2.3.2 Análise do Sinal Barkhausen.....	32
2.3.3 Instrumentação.....	34
2.3.4 Características do Método	36
2.4 Processo de Manufatura de Anéis para Rolamentos	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1 Materiais	39
3.2 Classificação das Amostras	40
3.3 Métodos	40
3.3.1 Análise das Tensões Residuais através do Método do Furo Cego	40
3.3.2 Análise das Tensões Residuais através do Método Micromagnético.....	42
4 RESULTADOS	44
4.1 Disposição dos Resultados	44
4.2 Análise das Tensões Residuais Através do Método do Furo Cego	44
4.2.1 Observação: Erros de Medida.....	44
4.2.2 Deformações Medidas	45
4.3 Tensões Equivalentes	45

4.3.1	Ângulos Principais.....	46
4.3.2	Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Conformado.....	48
4.3.3	Determinação das Tensões Residuais Presentes nos Anéis Usinados.....	49
4.3.4	Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Recozido.....	53
4.3.5	Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Temperado.....	55
4.4	Análise das Tensões Residuais Através do Método Micromagnético.....	58
4.4.1	Análise dos Sinais Micromagnéticos.....	58
4.4.2	Processo de Calibração.....	59
4.4.3	Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Conformado.....	61
4.4.4	Determinação das Tensões Residuais Presentes nos Anéis Usinados.....	61
5	DISCUSSÕES	65
5.1	Análise das Tensões Residuais Através do Método do Furo Cego	67
5.2	Análise das Tensões Residuais Através do Método Micromagnético.....	70
5.3	Comparação Entre os Métodos de Análise.....	73
6	CONCLUSÕES	76
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	ANEXO I.....	85
	I.1 Determinação das Tensões Residuais por Difração de raios X.....	85
	I.1.1 Visão Geral.....	85
	I.1.2 Breve Histórico	85
	I.1.3 Princípios Físicos	86
	I.2 Características da Medida das Tensões Residuais por Difração de raios X.....	89
	I.2.1 Características dos Picos de Difração	89
	I.2.2 Escolha das Constantes Elásticas do Material	90
	I.2.3 Ângulo de Difração (Ângulo de Bragg).....	91
	I.3 Análise da variação das Tensões Residuais com a Profundidade	91
	ANEXO II	93
	ANEXO III.....	95
	ANEXO IV	98
	ANEXO V	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Relações entre tempo, temperatura, tensão, deformação e microestrutura nos materiais de engenharia ⁷	5
Figura 2.2: Representação esquemática do processo de autofretagem.....	6
Figura 2.3: Diferentes fontes de microtensões residuais nos materiais de engenharia ¹	8
Figura 2.4: Distribuição complexa de tensões residuais na microestrutura de um material ¹⁷	9
Figura 2.5: Efeitos das tensões residuais nas características dos componentes mecânicos ¹⁸	9
Figura 2.6: Distribuição das tensões residuais na região interna de um anel para rolamentos ²²	11
Figura 2.7: Comparação entre as curvas S-N do material base e as amostras que sofreram os diferentes processos de Jato-percussão ²³	12
Figura 2.8: Distribuição das tensões residuais próximas a superfície do componente devido aos diferentes processos de Jato-percussão ²³	12
Figura 2.9: Percentual de utilização dos principais métodos de análise de tensões residuais na Inglaterra durante o ano de 1998 ¹⁶	16
Figura 2.10: Geometria do extensômetro tipo roseta definida pela norma ASTM E 837 ³⁶	17
Figura 2.11: Extensômetro tipo roseta de seis extensômetros de resistência elétrica ²⁸	18
Figura 2.12: Relação entre as dimensões do extensômetro e as dimensões do furo para o Método do Furo Cego ³⁵	19
Figura 2.13: Resultados da variação de deformação por incremento durante a simulação usinagem de um pequeno furo na superfície de um componente ⁴⁶	20
Figura 2.14: Geometrias típicas dos furos desenvolvidos por diferentes métodos de usinagem para o Método do Furo Cego ³⁴	23

Figura 2.15: Obtenção dos coeficientes α_{ij} através da usinagem incremental de um furo na superfície de um componente mecânico ⁶	26
Figura 2.16: Diagrama mostrando os princípios das calibrações computacional e experimental para o Método do Furo de análise das tensões residuais ³⁹	27
Figura 2.17: Curva de magnetização de um material ferromagnético ⁵⁷	31
Figura 2.18: Representação da Curva de Histerese para um material ferromagnético ⁶	32
Figura 2.19: Influencia do estado de tensões residuais e da dureza na curva de Histerese e na amplitude do sinal Barkhausen ⁶²	33
Figura 2.20: Configuração do sensor magnético utilizado no Método Micromagnético ⁶¹	34
Figura 2.21: Princípio da medida do sinal Barkhausen em função da profundidade ⁶⁶	35
Figura 2.22: Representação geral do processo de manufatura de anéis para rolamentos ⁶⁹	37
Figura 2.23: Representação dos sistemas de fixação interna de três pontos (a) e uniforme (b) do anel para o processo de usinagem ⁷¹	38
Figura 3.1: Microestruturas dos anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 nos estados conformados e usinados (a) e posteriormente temperado (b) ⁷⁰	39
Figura 3.2: Visualização da disposição dos extensômetros colados nos anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 para a análise das tensões residuais através do Método do Furo Cego.	41
Figura 3.3: Disposição do equipamento para a análise das tensões residuais em anéis para rolamentos através do Método do Furo Cego.	42
Figura 3.4: Geometria do sensor micromagnético desenvolvido para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético em anéis para rolamentos.	42
Figura 3.5: Disposição dos equipamentos para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético.	43

Figura 4.1: Variação das deformações medidas em três direções na posição angular de 20° para o anel Conformado.	45
Figura 4.2: Distribuição das tensões residuais equivalentes de von Mises em três posições angulares diferentes do anel Conformado, calculadas a partir de dados calculados através do Método da Integral.....	46
Figura 4.3: Variação dos Ângulos principais com a profundidade para os anéis para rolamentos do aço ABNT 52100, provenientes de diferentes etapas do processo de manufatura deste componente.	47
Figura 4.4: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Conformado.	48
Figura 4.5: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Conformado.	48
Figura 4.6: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Conformado.....	49
Figura 4.7: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado A.	50
Figura 4.8: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado A.....	50
Figura 4.9: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado A.....	51
Figura 4.10: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado B.....	52
Figura 4.11: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado B.	52

Figura 4.12: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado B.....	53
Figura 4.13: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo para o Anel Recozido.....	54
Figura 4.14: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo para o Anel Recozido.....	54
Figura 4.15: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Recozido.....	55
Figura 4.16: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Temperado.....	55
Figura 4.17: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Temperado.....	56
Figura 4.18: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Temperado Método...	56
Figura 4.19: Representação da variação de M_{max} com a posição angular, para todos os anéis, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz.....	58
Figura 4.20: Representação da variação de H_{cm} com a posição angular, para todos os anéis, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz.....	58
Figura 4.21: Representação da variação das tensões residuais com a posição angular, para todos os anéis, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz.....	60
Figura 4.22: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Conformado, obtidas através do Método Micromagnético.....	61
Figura 4.23: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Usinado A, obtidas através do Método Micromagnético.....	62

Figura 4.24: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Usinado B, obtidas através do Método Micromagnético.....	62
Figura 4.25: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Recozido, obtidas através do Método Micromagnético.....	63
Figura 4.26: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Temperado, obtidas através do Método Micromagnético.	64
Figura 5.1: Resultados obtidos, através do Método de Difração de raios X, para a análise da variação das tensões residuais, com a posição angular, para o anel Usinado A, na direção tangencial.....	66
Figura 5.2: Resultados obtidos, através do Método de Difração de raios X, para a análise da variação das tensões residuais, com a profundidade, para o anel Usinado A na direção tangencial, nas posições angulares de 160° e 210°.....	66
Figura 5.3: Resultados obtidos da análise das tensões residuais para o anel Recozido através do Método de Difração de raios-X na direção tangencial.....	67
Figura 5.4: Comparação entre os resultados obtidos através dos métodos de Difração de raios X e do Furo Cego, para o anel Usinado A, na direção tangencial.....	69
Figura 5.5: Comparação entre os resultados obtidos através dos métodos de Difração de raios X e Micromagnético, para o anel Usinado A, na direção tangencial.	72
Figura 5.6: Comparação entre os resultados obtidos através dos métodos de Difração de raios X e Micromagnético, para o anel Recozido, na direção tangencial.	73
Figura 5.7: Comparação dos resultados obtidos para a análise das tensões residuais no Anel Usinado A, na direção tangencial, através de três métodos diferentes.....	75
Figura I. 1: Ângulos de interferência construtiva (θ) para uma dada família de planos de distância interplanar (d), obedecendo a lei de Bragg ⁶	86

Figura I.2: Representação da distância interplanar para um material policristalino livre de tensões residuais ⁶	86
Figura I. 3: Representação das distâncias interplanares para um material policristalino contendo tensões residuais ⁶	87
Figura I. 4: Situação de tensão plana mostrando a variação do reticulo cristalino para um dado ângulo ψ ⁷⁷	87
Figura I. 5: Visão física do pico de difração de raios X para materiais policristalinos ⁶	89
Figura I. 6: Variação para o dublete $K\alpha$ para um aço simulado (hkl igual a 211) utilizando a radiação $CrK\alpha$ e o pico com 2θ a 156° ⁷⁷	90
Figura I. 7: Tensões em uma chapa plana após a remoção de uma camada da superfície.	92
Figura II. 1: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Conformado.	93
Figura II. 2: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Usinado B.	93
Figura II. 3: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Usinado B.	94
Figura II. 4: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Recozido..	94
Figura II. 5: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Temperado.	94
Figura III. 1: Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 0,4 MHz.....	95
Figura III. 2: Resultados das medidas de M_{max} , para o filtro de 0,4 MHz.....	95
Figura III. 3: Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 50 kHz.	96
Figura III.4: Resultados das medidas de M_{max} , para o filtro de 50 kHz.	96
Figura III. 5: Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 2 kHz.	96
Figura III. 6: Resultados das medidas de M_{max} , para o filtro de 2 kHz.	97
Figura III. 7: : Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 0,5 kHz.....	97
Figura III. 8: : Resultados das medidas de M_{max} , para o filtro de 0,5 kHz.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Profundidades de penetração, em geral, para diferentes técnicas de análise das tensões residuais ^{6,8}	14
Tabela 2.2: Resumo da distribuição das tensões residuais produzidas pela preparação da superfície do aço 1018 para a colagem de ERE ⁴⁷	22
Tabela 2.3: Tensões residuais (em MPa) medidas durante diferentes processos de usinagem de furos pelo método do furo ⁴⁹	23
Tabela 3.1: Composição química média dos aços ABNT 52100 ⁷³	39
Tabela IV. 1: Valores para as constantes de calibração do Método Micromagnético em função da frequência de análise e do estado do material.....	98
Tabela V.1: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Conformado na direção axial.....	99
Tabela V.2: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Conformado na direção tangencial.	100
Tabela V.3: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado A na direção axial.....	101
Tabela V.4: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado A na direção tangencial.	102
Tabela V.5: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado B na direção axial.....	103
Tabela V.6: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado B na direção tangencial.	104
Tabela V.7: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Recozido na direção axial.....	105

Tabela V.8: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Recozido na direção tangencial.	106
Tabela V.9: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Temperado na direção axial.	107
Tabela V.10: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Temperado na direção axial.	108

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	10
Equação 2.2	10
Equação 2.3	10
Equação 2.4	24
Equação 2.5	25
Equação 2.6	25
Equação 2.7	26
Equação 2.8	26
Equação 2.9	27
Equação 2.10	27
Equação 2.11	28
Equação 2.12	28
Equação 2.13	28
Equação 2.14	28
Equação 2.15	35
Equação 3.1	41
Equação 4.1	46
Equação 4.2	47
Equação 4.3	47
Equação 4.4	59
Equação I.1	86

Equação I.2	88
Equação I.3	88
Equação I.4	88
Equação I.5	88
Equação I.6	88
Equação I.7	88
Equação I.8	89
Equação I.9	91
Equação I.10	92
Equação I.11	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- a : Tamanho de defeito crítico de material
- $a(Z, z)$: Função de calibração da constante a para os métodos de Schajer
- a_{ij} e b_{ij} : Constantes de calibração na notação matricial
- $b(Z, z)$: Função de calibração da constante b para os métodos de Schajer
- B: Indução magnética
- C: Constante arbitrária
- $C_{elétrica}$: Condutividade elétrica do material
- C-ERE: Comprimento do extensômetro de resistência elétrica
- Curva S-N: Curva de fadiga que relaciona a tensão média aplicada com o número de ciclos ao qual o material resiste a esta tensão
- $d_{\phi\psi}$: distância interplanar na direção (ϕ, ψ)
- d : Distância interplanar
- d_0 : Distância interplanar para um material livre de tensões residuais
- da/dN : Taxa de propagação de trinca em fadiga
- D_{ext} : Diâmetro externo do anel
- D_f : Diâmetro médio do furo
- D_{int} : Diâmetro interno do anel
- D_m : Diâmetro médio do extensômetro tipo roseta
- E: Módulo de elasticidade
- ERE: Extensômetro de resistência elétrica
- f_A : Frequência máxima de análise do Sinal Barkhausen
- $f\alpha$ e $f\beta$: Fases α e β respectivamente
- h : Profundidade final do furo no Método do Furo.
- H: Intensidade do campo magnético aplicado
- H_{cm} : Coercitividade relativa ao Sinal Barkhausen
- hkl : Índices de Miller para um dado plano cristalino
- K_{min} e K_{max} : Fator de intensidade de tensões mínimo e máximo, respectivamente
- K_{res} : Fator de intensidade das tensões residuais
- K_x : Função de calibração para a direção x para o Método de Kockelmann
- K_y : Função de calibração para a direção y para o Método de Kockelmann
- L-ERE: Largura do extensômetro de resistência elétrica

Linha $K\alpha$: Linha de difração monocromática decorrente da transição eletrônica do subnível L para o nível K

Linha $K\alpha_1$: Linha de difração monocromática decorrente da transição eletrônica do subnível L_{III} para o nível K

Linha $K\alpha_2$: Linha de difração monocromática decorrente da transição eletrônica do subnível L_{II} para o nível K

Linha $K\beta$: Linha de difração monocromática decorrente da transição eletrônica do subnível M para o nível K

m: Constante que depende das condições do material durante o ciclo de fadiga

M: Magnetização remanescente

M_{max} : Intensidade máxima do Sinal Barkhausen

MTR_{max} e MTR_{min} : Máxima tensão residual máxima e mínima, respectivamente

n: Número de multiplicidade de uma família de planos cristalinos

N: Número relativo do incremento

P_1, \dots, P_n : Termos da Série de Potências

PR: Processos de rotação dos domínios magnéticos

R: Razão de Carregamento

R^2 : Coeficiente de correlação quadrática

R_{eff} : Razão de carregamento efetiva

x_1, x_2 e x_3 : Constantes de calibração relativas do Método Micromagnético

Z: Profundidade de um dado incremento no Método do Furo

Z_0 : Espessura da peça antes da remoção de material

Z_1 : Espessura da peça após a remoção de material

Z_n : Profundidade relativa do furo no incremento N

2θ : Ângulo de Bragg

$\varepsilon_{\phi\psi}$: Deformação induzida pela presença de tensões residuais na direção (ϕ, ψ)

σ_{ϕ} : Tensão residual atuando na direção (ϕ)

θ : Ângulo de incidência da radiação X

ϕ : Ângulo entre a componente de tensão no plano da superfície e a direção da medida

ψ : Ângulo entre a direção normal à superfície e a direção da medida

ϖ : Ângulo entre o feixe incidente e a direção normal à superfície

ν : Coeficiente de Poisson

δ : Profundidade de pele

σ_{Ext} : Tensões externas

ΔK : Variação do fator de intensidade de tensões

ΔK_{eff} : Variação efetiva do fator de intensidade de tensões
 σ_{TR} : Tensões residuais
 ξ : Razão entre a profundidade do incremento e o diâmetro final do furo.
 ΔK_{Th} : Limite inferior de ΔK
 β : Ângulo principal
 $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$: Deformações medidas nos ERE a, b e c, respectivamente
 λ : Comprimento de onda da radiação X incidente
 μ_0 : Permeabilidade do vácuo
 μ_r : Permeabilidade relativa do material
 σ : Tensão aplicada uniaxial
 $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$: Tensões residuais calculadas para as direções dos ERE a, b e c
 σ_C : Tensão residual corrigida
 σ_d : Tensão residual determinada
 σ_e : Limite de escoamento
 σ_{eq} : Tensão residual equivalente de Von Misses
 σ_{eqb} e σ_{SC} : Componente de tensão residual equibiaxial e cisalhante, respectivamente
 σ^{Macro} e σ^{Micro} : Tensões Residuais Macroscópicas e Microscópicas, respectivamente
 σ_{max} e σ_{min} : Tensões residuais principais máximas e mínimas, respectivamente
 σ_{tan} e σ_{axial} : Tensões residuais nas direções tangencial e axial, respectivamente
 σ_{MM} : Tensão residual determinada através do Método Micromagnético
 σ_x e σ_y : Tensão atuando nas direções x e y, respectivamente
 τ_{xy} : Tensão de cisalhamento

RESUMO

Os conceitos teóricos e práticos sobre as características da distribuição de tensões residuais vêm sendo estudados a partir do início da década de 1930. Desde então, o desenvolvimento de novos equipamentos e a necessidade de valores quantitativos mais representativos, tornaram necessários o estudo e o aprimoramento teórico prático dos métodos disponíveis de caracterização das tensões residuais, visando, principalmente, o maior entendimento dos efeitos que essas tensões exercem no desempenho dos componentes mecânicos em geral. Sendo parte adicional do projeto SFB 570, neste trabalho foi realizada uma análise comparativa entre os métodos do Furo Cego e Micromagnético de análise das tensões residuais, a fim de verificar a aplicabilidade de cada método na caracterização dos campos de tensões residuais presentes em anéis para rolamentos do aço ABNT 52100. Foram analisadas cinco amostras, provenientes de diferentes etapas do processo de manufatura de anéis para rolamentos do aço ABNT 52100, contendo diferentes distribuições de tensões residuais. Alguns conceitos a respeito das características das tensões residuais e da aplicação de cada método foram revistos, assim como da natureza da distribuição de tensões residuais em anéis para rolamentos. Fatores como a distribuição de tensões residuais com a profundidade, características do componente, tempo de resposta e tipo de intervenção da técnica, foram revistos e considerados como limitantes para a aplicação de cada método. Alguns resultados obtidos foram comparados com resultados provenientes da análise de tensões residuais através do Método de Difração de raios X, a fim de verificar a representatividade de cada método. Os resultados encontrados estão dentro da escala compreensível para cada amostra, considerando-se as origens da variação das tensões residuais durante um processo de manufatura de anéis para rolamentos, e apontam para o uso complementar das técnicas utilizadas, onde cada método apresenta vantagens e limitações, atuando em escalas singulares de distribuição das tensões residuais.

ABSTRACT

The experimental and theoretical concepts about the residual stress distribution have been studying since 1930. The development of new equipment and the necessity of better representative quantitative values, made the study and the improvement of these concepts necessary at this time. In this work, which is an additional part of SFB 570 project, a comparative analysis between the Blind Hole Drilling and the Micromagnetic Methods was carried through, in order to verify the applicability of each method in the characterization of residual stress fields in an ABNT 52100 ball bearing steel rings. Five samples, from different manufacturing steps for the ABNT 52100 ball bearing steel rings, having different residual stress distributions, varying with depth and angular position in the sample, have been analyzed. Some concepts regarding the characteristics of residual stresses and the application of each method have been reviewed, as well as the nature of the residual stress distribution in a ball bearing steel ring. The residual stress depth distribution, the physical properties and geometry of the material, the time consumed and type of intervention are some factors used to compare and find the best range for the application of each method. Some results obtained in this work, have been compared with results proceeding from the analysis of residual stresses by the X-ray Diffraction Method, to verify the reliability of the Blind Hole Drilling and the Micromagnetic Methods. The results full fill the expectation in the residual stress range for each sample and are an indicative for the necessity of the complementary use of these techniques, where each one, besides presenting advantages and disadvantages, works in a specific range of depth and local surface resolution.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O advento da mecânica da fratura provou que o desempenho dos componentes mecânicos de engenharia pode ser avaliado através do estudo das características dos defeitos presentes no interior do componente ou do estudo do estado de tensões ao qual este está sujeito. Entende-se por estado de tensões, a superposição entre as tensões causadas pela ação de forças e momentos externos e as tensões residuais.

Outra importante informação, adquirida com base nos conceitos teóricos da mecânica da fratura, define a superfície como a região de maior responsabilidade nos componentes mecânicos, por ser esta a região que faz a interface entre o material e o meio externo e por ser, geralmente, a região, do componente, que sofre as solicitações mais severas. A partir disto, qualquer processo de melhoria da superfície resultará numa melhoria significativa do desempenho do material, sempre que soubermos o estado de tensões ao qual este está submetido.

É sabido que a grande maioria dos processos de manufatura e de alteração da superfície produz ou altera o estado de tensões residuais presente em um componente mecânico. Em vista disto, as tensões residuais têm sido objeto de crescente interesse, e em alguns casos, de preocupação dos diversos segmentos industriais. Deste modo, a compreensão dos fatores que dão origem às tensões residuais, assim como a influência que estas tensões exercem no desempenho, é essencial para o desenvolvimento e para a melhoria de componentes mecânicos de engenharia.

Durante muito tempo, as tensões residuais foram ignoradas, a partir da utilização de elevados coeficientes de segurança, no desenvolvimento de estruturas e componentes mecânicos. Porém, as aplicações atuais exigem o desenvolvimento de componentes de menor massa, melhor performance e geometrias complexas, o que justifica o estudo e o desenvolvimento de métodos mais precisos para a caracterização das tensões residuais.

Em vista dos diferentes conceitos, aos quais se baseiam cada método, e/ou das diferentes propriedades às quais são utilizadas para caracterizar o estado de tensões residuais, os diferentes métodos de caracterização da distribuição de tensões residuais têm aplicação restrita para diferentes escalas, tipos de materiais, tipos de intervenção e geometria de componente, entre outros.

Atualmente, poucos métodos possuem uma norma completamente aceita e reconhecida para a medida de tensões residuais não uniformes. Deste modo, o procedimento de aplicação dos métodos de análise das tensões residuais, assim como a configuração dos equipamentos, deve variar de amostra para amostra, segundo uma série de fatores, tais como, geometria, distribuição de tensões residuais, tipo de material, dimensões do componente, entre outros.

Neste trabalho, anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 foram utilizados para comparar a aplicabilidade dos métodos do Furo Cego e Micromagnético de análise das tensões residuais. Buscando destacar as vantagens e limitações de cada método para a análise das tensões residuais quando temos diferentes distribuições de tensões residuais presentes neste tipo de componente mecânico.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a análise comparativa entre os métodos do Furo Cego e Micromagnético para a avaliação das tensões residuais em anéis para rolamentos do aço ABNT 52100. Para tal, foram utilizadas amostras extraídas de diferentes etapas do processo de manufatura destes componentes, apresentando assim, diferentes distribuições de tensões residuais.

1.3 Justificativa

O presente trabalho é parte adicional do projeto SFB 570 (Sonderforschungsbereich, – Escala especial da pesquisa), em execução no Stiftung Institut fuer Werkstofftechnik (IWT) da Universidade de Bremen, Alemanha. Este projeto, iniciado em 2001, é financiado pela Deutsche Forschungsgemeinschaft (Associação Alemã de Pesquisa) e possui um prazo de duração de 12 anos (prazo máximo de duração de um projeto financiado pelo governo alemão).

As metas do projeto SFB 570 são explorar as razões intrínsecas da distorção em componentes de aço durante o processo de manufatura. Para tal, três geometrias de componentes foram selecionadas: Anéis para rolamentos, eixo e engrenagem de rodas.

Estes componentes estão sendo completamente caracterizados segundo uma série de propriedades, tais como: Geometria, composição química, microestrutura, composição de fases, textura cristalográfica e distribuição de tensões residuais. Esta caracterização objetiva avaliar a propagação do potencial de distorção durante o processo de manufatura, ou seja, a soma de todas as possíveis causas de distorção durante uma dada etapa do processo de manufatura, que são acumuladas e transferidas para a etapa seguinte.

O projeto SFB 570 é dividido em três grupos de subprojetos, são eles:

Os subprojetos A: Os quais visam o estudo dos mecanismos para a causa da distorção;

Os subprojetos B: Os quais visam o estudo dos métodos que influenciam na distorção;

Os subprojetos C: Os quais possuem tarefas de projetos cruzados, ou seja, prestam medidas experimentais para os demais projetos.

Dentre estes, encontra-se o subprojeto SFB 570-C2, o subprojeto responsável pelas medidas de tensões residuais nos três tipos de componentes mecânicos analisados.

Até o presente momento, o Método de Difração de raios X, tem sido, o método, predominantemente, utilizado para estas análises de tensões residuais. Isto ocorre, principalmente, por ser este um método direto de grande precisão, reprodutibilidade, aplicável a uma vasta gama de materiais e ainda, pelo fato do IWT ter a sua disposição mais de 15 equipamentos difratômetros voltados para a análise das tensões residuais.

Apesar das muitas vantagens em sua utilização, o Método de Difração de raios X para a análise das tensões residuais apresenta algumas limitações, tais como, o elevado tempo de medida (em geral de 2 a 6 horas por ponto), o tamanho limitado de amostra e o pequeno volume analisado, entre outros. Estas limitações justificam o desenvolvimento e a utilização de outros métodos para a completa caracterização do estado de tensões residuais nos diversos componentes mecânicos analisados.

Detalhes adicionais sobre a análise das tensões residuais através do Método de Difração de raios X estão disponíveis no Anexo I.

1.4 Distribuição do Trabalho

O trabalho está dividido da seguinte forma:

Revisão Bibliográfica: Revisando alguns conceitos e definições sobre das tensões residuais, suas origens, influências e aplicações; Definindo as principais características de cada método e do processo de manufatura de anéis para rolamentos, utilizado no projeto SFB 570;

Materiais e Métodos: Disponibilizando todas as informações técnicas relevantes, sobre as características dos materiais e os procedimentos adotados em cada método, para a realização deste trabalho;

Resultados: Apresentando os resultados das análises das tensões residuais através do Método do Furo Cego e do Método Micromagnético;

Discussão: Discutindo os resultados apresentados no capítulo anterior e comparando-os com alguns resultados, provenientes da análise das tensões residuais através do Método de Difração de raios X, de etapas anteriores do projeto SFB 570;

Conclusões: Destacando as principais informações obtidas neste trabalho;

Sugestões: Indicando o que pode ser feito futuramente, para continuar e melhorar o que foi concluído neste trabalho.

Observação: Apesar do estudo das origens em potencial da ocorrência de distorções durante o processo de manufatura de componentes mecânicos ser o objetivo principal do projeto SFB 570, nenhuma analogia entre os resultados obtidos e a evolução da ocorrência de distorções durante o processo de manufatura foi realizada neste trabalho. Isto porque, este tipo de estudo necessitaria de um número maior de informações sobre o processo e sobre as características dos materiais utilizados, o que consiste na soma de todas as informações provenientes dos diversos subprojetos do SFB 570, o que vai além dos objetivos deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tensões Residuais

2.1.1 Visão Geral

Tensões residuais são as tensões elásticas existentes em um material rígido estacionário na ausência de carregamentos externos e/ou gradientes de temperatura¹⁻⁶.

Estas tensões estão relacionadas à quantidade de energia elástica armazenada no material e são consequência direta da interação entre tempo, temperatura, tensão, deformação e microestrutura, promovendo uma variação significativa das propriedades mecânicas do componente, como pode ser visto na Figura 2.1:

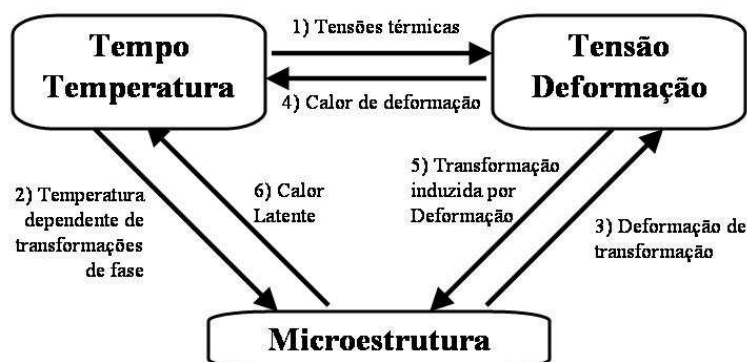


Figura 2.1: Relações entre tempo, temperatura, tensão, deformação e microestrutura nos materiais de engenharia⁷.

Da Figura 2.1, destaca-se que as tensões térmicas são originadas pela ocorrência de gradientes de temperatura em uma secção do material. A variação de microestrutura, induzida pela temperatura, é outro fator que pode originar mudanças na distribuição das tensões residuais, assim como a deformação por transformação, a deformação sob tensão e a transformação induzida por deformação⁷.

É estabelecido atualmente que nenhum material, componente e estrutura de importância técnica se apresenta livre de tensões residuais^{8,9}. Estas tensões são decorrentes do

processamento e da história prévia do componente e são originadas sempre que o componente sofre deformação plástica localizada ou é sujeito a um gradiente de temperatura não-uniforme¹⁻³.

Qualquer processo de manufatura que altere a forma do sólido ou que imprima algum gradiente de temperatura pode originar tensões residuais¹⁰. Sendo assim, processos como a Soldagem, a Jato-percussão (*Shot Peening*), a Usinagem e a Autofretagem, entre outros, originam tensões residuais em componentes mecânicos^{4,6,11}.

2.1.2 Origens das Tensões Residuais

Em geral as tensões residuais podem ser originadas por processos de:

Origens Mecânicas: As tensões residuais de origens mecânicas ocorrem devido à deformação plástica não-uniforme em alguma região do material, causada por um processamento mecânico. Podemos citar a Autofretagem de um cilindro metálico, de parede grossa pela pressurização interna, Figura 2.2, como exemplo.

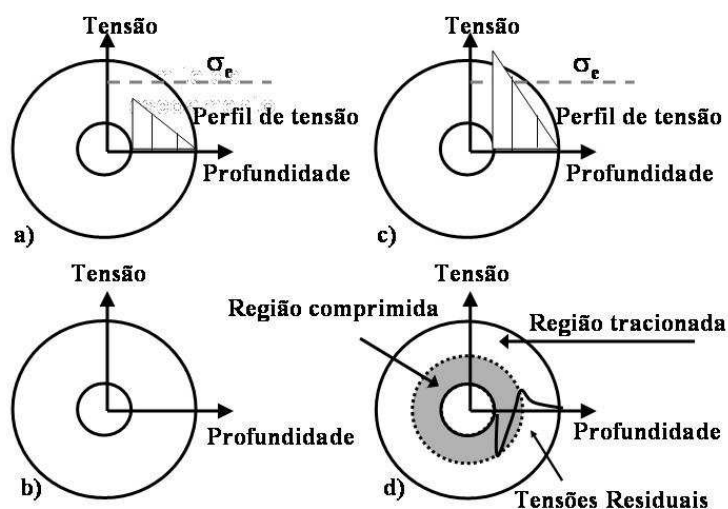


Figura 2.2: Representação esquemática do processo de autofretagem.

Com o aumento da pressão interna o material da região interna do tubo excede o limite de escoamento local, como demonstrado na Figura 2.2c. A zona plasticada penetra profundamente no cilindro à medida que se aumenta a pressão interna. Quando a pressão é aliviada a porção externa, deformada apenas elasticamente, tende a retornar para o seu estado original, mas este movimento é impedido pela deformação plástica que foi introduzida na região interior do tubo. Como resultado a região externa apresentará um perfil de tensões residuais trativas e a região interna apresentará um perfil de tensões residuais compressivas,

Figura 2.2d, distribuídas a partir de sua superfície até uma profundidade limite, a qual depende dos parâmetros de autofretagem e da ductilidade do material ^{9,12,13}. Na Figura 2.2a, temos a representação de um tubo de parede grossa sujeito à aplicação de um carregamento mecânico abaixo do limite de escoamento (σ_e), neste caso, a peça não sofre plastificação e após a retirada do carregamento externo (Figura 2.2 b) esta não apresentará uma distribuição de tensões residuais adicionais, decorrente deste processo.

Origens Térmicas: As tensões residuais de origens térmicas são resultantes da distribuição não-uniforme de temperatura numa dada região do componente. Esta distribuição pode ser produzida, por exemplo, pela variação não-uniforme de temperatura propriamente dita ou pela diferença nos coeficientes de expansão térmica entre fases adjacentes, as quais provocam a ocorrência de deformação plástica localizada em algumas regiões do componente durante um dado ciclo térmico^{5,6}.

Origens Metalúrgicas: São as Tensões residuais associadas às mudanças de volume decorrentes de reações químicas ou transformações de fases no material^{5,6}. Devido às diferenças entre as propriedades elásticas e cristalinas entre fases adjacentes, a menos que a transformação seja completamente homogênea, sempre teremos o desenvolvimento de tensões residuais na transformação de fase como consequência da dilatação volumétrica localizada¹⁴.

Geralmente as tensões residuais são originadas por processos complexos, dados pela combinação entre fatores de naturezas, mecânicas, térmicas e metalúrgicas¹⁵.

2.1.3 Classificação das Tensões Residuais

Quanto à escala na qual se distribuem, as tensões residuais podem ser classificadas em três tipos, segundo o sistema alemão de classificação, sendo estes:

Tensões residuais macroscópicas (Tipo I): São as tensões residuais que se distribuem em larga escala e se equilibram por todo o componente. As macrotensões residuais são originadas pelos processos de manufatura e se superpõem às tensões externas aplicadas no componente. Portanto, estas são as tensões que apresentam maior interesse no ramo da engenharia^{1,4,5,6,10}.

Tensões residuais microscópicas (Tipo II): São as tensões que se distribuem em pequena escala, relativa a um certo número de grãos (em geral, de 3 a 10 vezes o tamanho de grão). São as tensões residuais originadas pela heterogeneidade e a anisotropia de cada cristal ou grão de um material policristalino^{1,4,5,6,16}.

Tensões residuais microscópicas (Tipo III): São as tensões residuais existentes na escala atômica, correspondente a ação criada por todos os diferentes tipos de defeitos cristalinos^{1,4,5,6,16}.

O sistema americano de classificação, considera apenas a divisão entre macro e microtensões residuais, sendo esse sistema o mais utilizado neste trabalho.

A Figura 2.3 apresenta uma representação dos defeitos cristalinos que originam as microtensões .

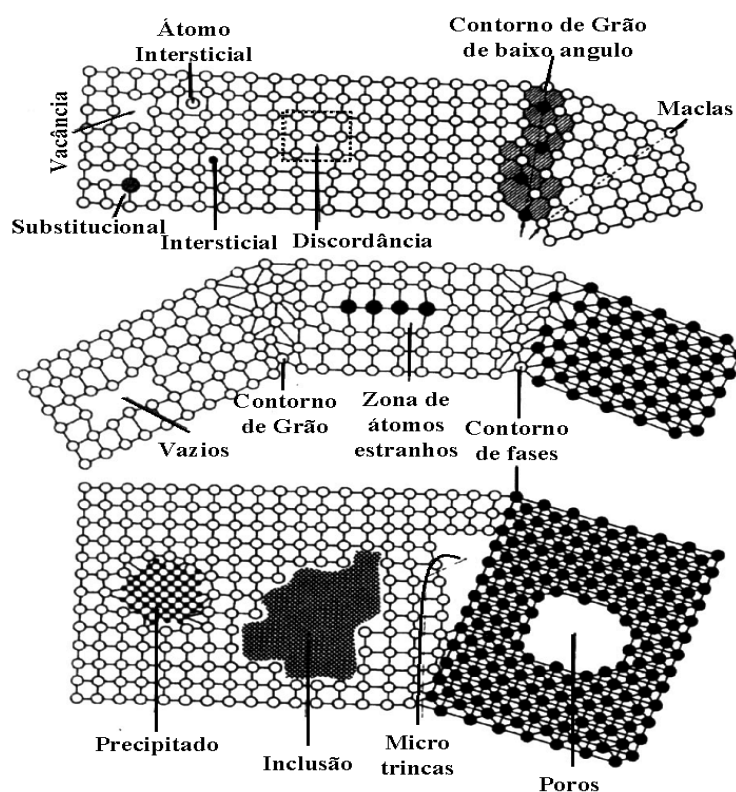


Figura 2.3: Diferentes fontes de microtensões residuais nos materiais de engenharia¹.

As presenças de estados de tensões residuais apenas de tipo II e III são difíceis¹. Geralmente, a distribuição de tensões residuais em um componente mecânico se apresenta de forma mais complexa, contendo a presença de tensões residuais macro e microscópicas, como representa a Figura 2.4, a seguir .

Na Figura 2.4, percebe-se que σ^{Macro} (tensões residuais macroscópicas) representam o valor médio das macrotensões residuais atuando em cada fase e que estão distribuídas por toda a seção da peça. Enquanto isso, as porções referentes as microtensões residuais (σ^{Micro})

referentes às fases α ($f\alpha$) e β ($f\beta$), têm suas distribuições em pequena escala e não se superpõem umas às outras.

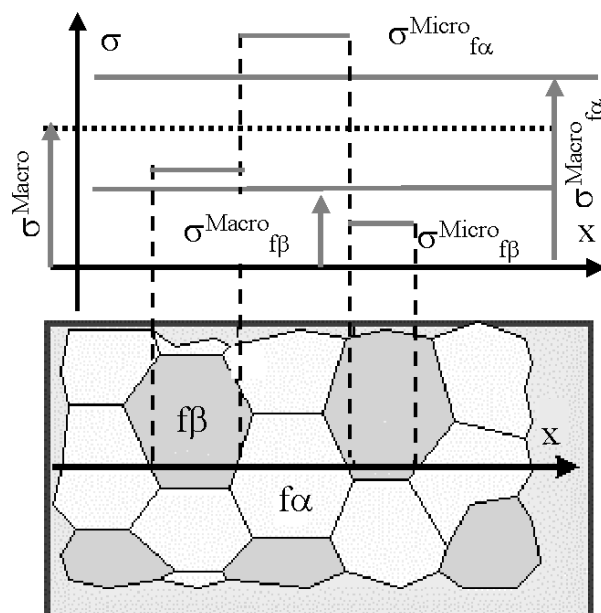


Figura 2.4: Distribuição complexa de tensões residuais na microestrutura de um material¹⁷.

2.1.4 Efeito das Tensões Residuais nos Componentes Mecânicos

A Figura 2.5 apresenta um resumo dos efeitos mais importantes das tensões residuais em componentes de engenharia. Esta lista não está completa, pois existem outros efeitos como ópticos, acústicos ou térmicos influenciados pela presença de tensões residuais.

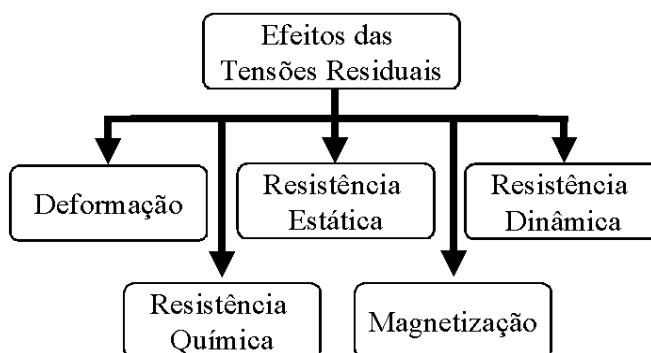


Figura 2.5: Efeitos das tensões residuais nas características dos componentes mecânicos¹⁸.

Para um material plasticamente deformável, as tensões residuais e as tensões aplicadas podem agir em conjunto na escala elástica, de modo que, no carregamento estático, estas tensões se somam algebricamente⁴.

Assim, a presença de tensões residuais afeta significativamente todos aqueles fenômenos que ocorrem a baixos níveis de tensões ($\sigma < \sigma_e$), como a fratura frágil, a fragilização por hidrogênio, a corrosão sob tensão e a falha por fadiga¹¹.

Em geral, o efeito das tensões residuais pode ser benéfico ou prejudicial dependendo da magnitude, sentido, distribuição, profundidade e estabilidade destas tensões no componente^{1,4,5,6,9}.

Na fadiga, na maioria dos casos, a nucleação da trinca se dá na superfície do componente. Assim, a presença de tensões residuais compressivas nesta região pode melhorar o desempenho do componente. Mas a presença do perfil de tensões residuais nas subcamadas, abaixo da superfície, influi diretamente na etapa de propagação de trinca, reduzindo ou melhorando o desempenho do componente^{19,20}. Em geral, a presença de tensões residuais compressivas na superfície pode elevar o ΔK_{Th}^i do material, visto que estas alteram a razão de carregamento (R) do componente para um valor efetivo (R_{eff}) dado pela Equação 2.1. Esta equação indica a superposição das tensões residuais com as tensões máximas e mínimas aplicadas durante o ciclo de carregamento, onde K_{min} é o Fator de intensidade de tensões mínimo. K_{res} é o fator de intensidade das tensões residuais e K_{max} o fator de intensidade de tensões máximo^{13,19}

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (2.1)$$

A curva do crescimento de trinca em fadiga do componente neste estado será dada pela Equação 2.2¹⁹, onde: da/dN é a taxa de propagação de trinca, C é uma constante, ΔK_{eff} (dado pela Equação 2.3 na qual se considera a superposição das tensões residuais, σ_{TR} , com as tensões externas, σ_{Ext} , a é o tamanho de defeito crítico), ΔK_{eff} é o valor efetivo da variação do fator de intensidade de tensões (considerando-se a influência do perfil de tensões residuais) e m é uma constante que depende das condições do material¹⁹:

$$da/dN = C \Delta K_{eff}^m \quad (2.2)$$

ⁱ ΔK é a variação do fator de intensidade de tensões, da mecânica da fratura. ΔK_{Th} , é ΔK o de Threshold, correspondente ao limite inferior de ΔK para o qual não há propagação de trinca ou esta propagação se dá a uma taxa não detectável para fins práticos.

$$\Delta K_{eff} = (\sigma_{Ext} + \sigma_{TR})(\pi a)^{1/2} \quad (2.3)$$

No capítulo introdutório foi dito que a superfície é a região mais solicitada do componente. Contudo a mecânica da fratura provou que a existência de defeitos no interior do material deve ser considerada na análise do desempenho do componente²¹. Conseqüentemente, a distribuição das tensões residuais, no interior do componente, torna-se de grande importância para a correta caracterização e estudo da influência que estas tensões exercem nas suas propriedades¹⁸.

A Figura 2.6 exemplifica o que foi dito anteriormente, apresentando uma distribuição de tensões residuais, próximas a superfície interna de um anel para rolamentos²². É natural afirmar que a presença de tensões residuais compressivas na superfície aumenta a vida útil do componente frente ao carregamento cíclico, por reduzir a tensão média a qual ele está submetido²². Contudo, a presença de tensões residuais trativas, de alta magnitude, a uma profundidade a partir de 15 μm abaixo da superfície pode acelerar a propagação de defeitos levando à falha catastrófica do componente. Deste modo, torna-se importante, além da magnitude e do sentido das tensões residuais, a escala de profundidades nas quais estas tensões se distribuem^{13,22}.

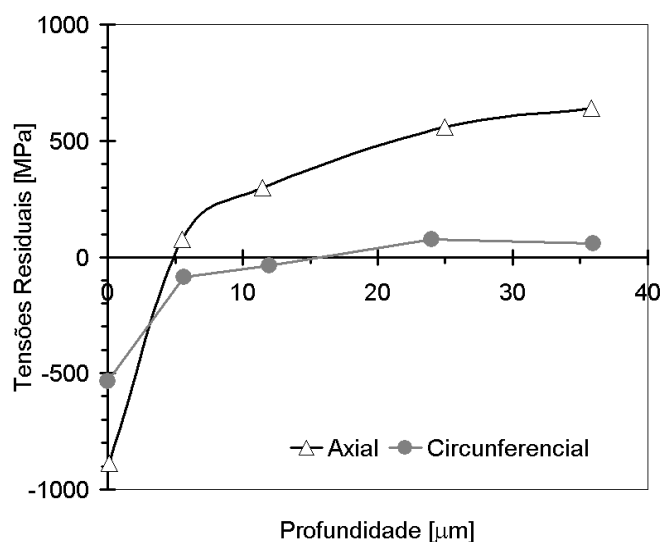


Figura 2.6: Distribuição das tensões residuais na região interna de um anel para rolamentos²².

Torres e Voorwald²³ estudaram a influência da intensidade do processo de Jato-percussão na resistência à fadiga usando chapas de aço AISI 4340 no estado temperado e revenido. Foram ensaiadas amostras sujeitas a quatro intensidades diferentes de Jato-percussão (5,5, 8,9, 12,4 e 31 [$\times 10^{-2}$ MPa]), juntamente com uma amostra do material não

processada. As propriedades mecânicas dos aços AISI 4340 relevantes para este trabalho foram: Limite de escoamento de 1511 MPa e limite de fadiga de 800 MPa. Os resultados estão representados em forma de curvas S-N¹³ e de um gráfico mostrando a distribuição das tensões residuais (medidas por Difração de raios X) próximas a superfície do componente nas Figuras 2.7 e 2.8:

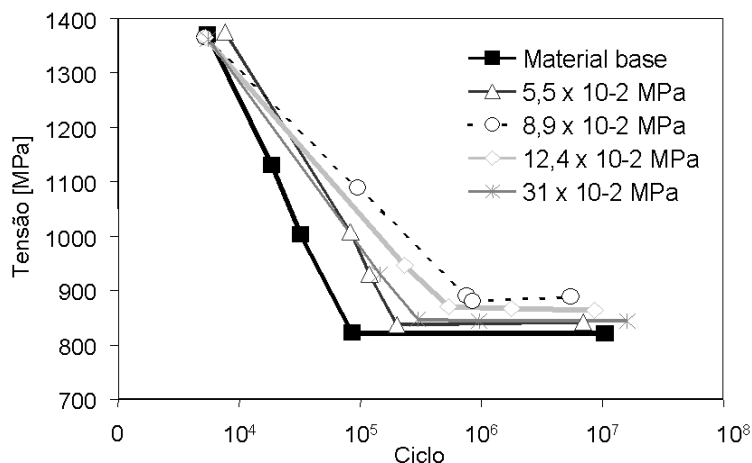


Figura 2.7: Comparação entre as curvas S-N do material base e as amostras que sofreram os diferentes processos de Jato-percussão²³.

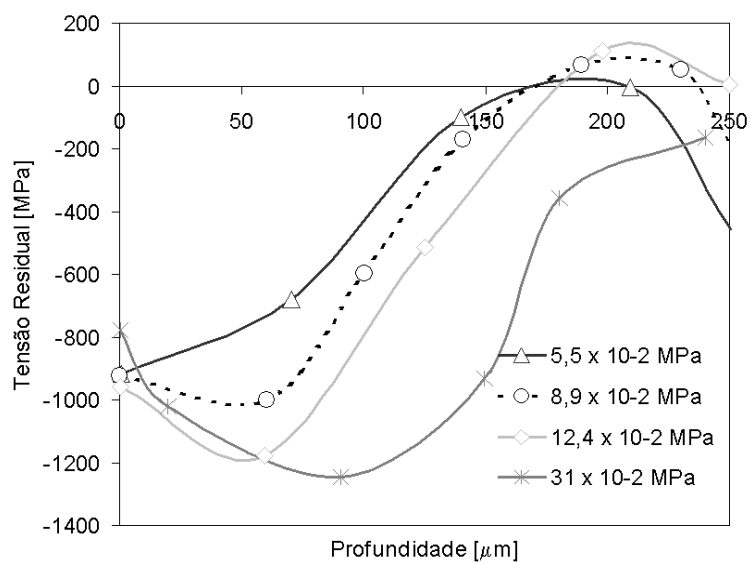


Figura 2.8: Distribuição das tensões residuais próximas a superfície do componente devido aos diferentes processos de Jato-percussão²³.

Os autores constataram que o processo de Jato-percussão aumentou a vida em fadiga do componente como pode ser visto na Figura 2.7. A Figura 2.8 mostra que, na superfície, o valor das tensões residuais compressivas foi quase idêntico em todos os processos, provando

que a distribuição das tensões residuais nesta região está mais relacionada às características mecânicas e as condições da superfície do que à intensidade do Jato-percussão. Outro fator importante foi que a intensidade do processo de Jato-percussão variou proporcionalmente à profundidade da máxima tensão residual compressiva encontrada no componente. Contudo, a amostra que sofreu processo de maior intensidade não foi a que apresentou melhores resultados para as curvas de fadiga, deixando indícios da influência da estabilidade das tensões residuais no desempenho do componente²³.

2.1.5 Estabilidade das Tensões Residuais

Löhe e Vöhringer²⁴ constataram que a melhoria das propriedades mecânicas dos materiais, através da introdução de tensões residuais, só será efetiva se estas tensões forem estáveis nas áreas de alta sollicitação (sendo esta, na maioria dos casos, na superfície do componente)²³. As tensões residuais podem ser reduzidas ou completamente aliviadas pela aplicação de energia mecânica e/ou térmica. O alívio das tensões residuais também é concebível pela formação e propagação de trincas^{6,13,14}. Os melhores e mais conhecidos meios de alívio das tensões residuais são o recozimento, a deformação uniaxial e a deformação cíclica^{6,24}.

2.1.6 Medida das Tensões Residuais

Algumas considerações a respeito das tensões residuais são importantes, as quais:

- Atualmente, não existe um método barato, simples e reprodutível de medida direta das tensões residuais¹.
- O limite máximo das tensões residuais, em módulo, é a tensão de escoamento local do material. Acima deste valor, o material sofre deformação plástica acarretando no alívio e na redistribuição das tensões residuais³.
- Em geral, para o desenvolvimento de materiais metálicos, as microtensões residuais são consideradas de baixa importância^{4,8}.
- Não apenas as tensões residuais na superfície, mas também o perfil de tensões residuais é de grande importância na caracterização do componente²².

- Devido ao fato de que as técnicas de medida das tensões residuais atuam em diferentes escalas de volume e profundidade analisados, estas podem medir diferentes valores de tensões residuais em uma mesma região do componente⁴.
- Devido ao gradiente de tensão, a menos que o campo de tensões residuais presente no componente seja bem conhecido, as medidas de tensões residuais devem ser efetuadas em vários pontos a fim de se obter a distribuição e a magnitude deste campo de maneira mais confiável¹⁰.
- Uma idéia pré-concebida do campo de tensões residuais permite relacionar o melhor método, a localização e o número de medidas a serem realizadas no componente mecânico¹⁰.
- Apesar da expressão “*medida das tensões residuais*” ser comumente utilizada, é importante lembrar que o campo de tensões residuais é uma propriedade extrínseca do material e não pode ser medido diretamente. Assim as tensões residuais são determinadas a partir da medida de alguma propriedade intrínseca do material²⁵.

A Tabela 2.1 mostra os limites dimensionais no qual alguns métodos atuam. Os valores apresentados são para medidas em geral. Eles não consideram condições especiais como o tipo de fonte de raios X utilizada, a precisão dos equipamentos de usinagem para o Método do Furo Cego, a utilização de filtros de frequência de análise especiais para os Métodos Magnéticos, entre outros.

Tabela 2.1: Profundidades de penetração, em geral, para diferentes técnicas de análise das tensões residuais^{6,8}.

Técnica	Penetração	
	Mínima	Máxima
Método do Furo Cego	20 [μm]	2 [mm]
Difração de raios X	1 [μm]	50 [μm]
Difração de nêutrons	1,5 [mm]	10 [mm]
Método Magnético	10 [μm]	1 [mm]
Ondas Ultra sonoras	15 - 300 [μm]	1 [mm]

A partir dos valores apresentados na Tabela 2.1, percebe-se que uma série de critérios indicados para o desenvolvimento e para a seleção de uma dada técnica de análise de tensões residuais pode ser derivada:

O método escolhido deve ser barato (quando comparado ao custo do componente), prático, reproduzível e preferencialmente aplicável a uma vasta gama de materiais; Deve evitar introduzir, durante a sua aplicação, um nível de tensões residuais adicionais e deve agir na escala necessária para a caracterização representativa do perfil de tensões residuais em um dado componente. O método selecionado deve, necessariamente, medir as macrotensões residuais e, se possível, as microtensões e preferencialmente não deve ser prejudicial ao desempenho do componente^{4-10,16,17}. Deste modo, a técnica a ser utilizada pode ser escolhida segundo uma série de parâmetros, tais como:

1. Natureza do material;
2. Classe de tensões residuais presentes no material;
3. Distribuição das tensões residuais no componente;
4. A geometria do componente;
5. Onde a medida será realizada (no laboratório ou em campo);
6. Tipo de intervenção (destrutiva ou não-destrutiva);
7. Tempo de análise e apresentação dos resultados;
8. Precisão e reprodutibilidade do método;
9. Custo final da medida⁶.

Assim sendo, de maneira geral, os métodos de análise das tensões residuais podem ser divididos em métodos destrutivos e não destrutivos.

Os métodos destrutivos são baseados na medida da deformação elástica localizada, originada pela relaxação das tensões residuais, devido à remoção de um certo volume de material do componente. Os principais métodos destrutivos são os Métodos do Furo, de Remoção de Camada e do Seccionamento, entre outros^{1,4,8,10}.

Os métodos não-destrutivos são baseados na interação entre o campo de tensões residuais e as propriedades físicas do material. Propriedades como a deformação no retículo cristalino, a variação na taxa de magnetização ou a variação da velocidade de propagação de uma onda sonora no interior do material podem ser relacionadas com a distribuição de tensões residuais. Dentre os métodos não destrutivos de análise das tensões residuais, podemos citar os Métodos de Difração (Nêutrons e raios X), Métodos Magnéticos, Métodos de Ultra-som, entre outros^{3,4,8,10}.

A Figura 2.9 apresenta os resultados de um trabalho realizado em 1998 pelo “National Physics Laboratory”, situado na Inglaterra, onde, através de questionários práticos, os pesquisadores buscaram obter informações a respeito dos métodos mais utilizados de análise das tensões residuais naquele país. Percebe-se que os métodos não-destrutivos representam mais de 50% dos métodos de análise das tensões residuais utilizados. Os métodos classificados como Outros envolvem os métodos de ultra-som, magnéticos, Raman, etc. Outros resultados importantes deste trabalho foram que, dos mais de 50 grupos empresariais e laboratoriais consultados, 48% trabalham com metais e mais de 80% consideram que a análise de tensões residuais tem grande ou média importância em seus negócios¹⁶.

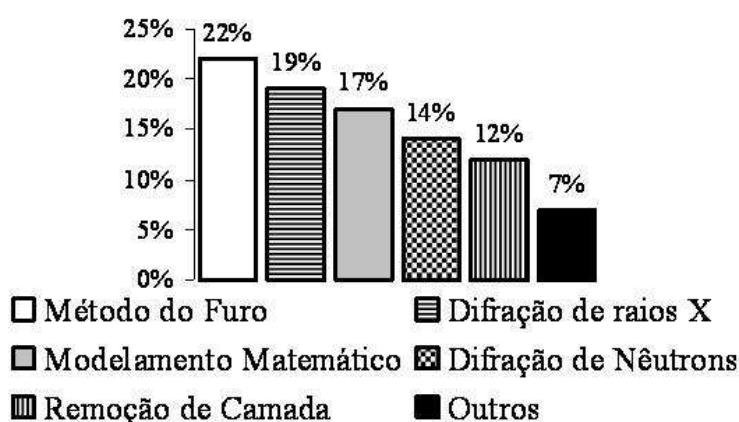


Figura 2.9: Percentual de utilização dos principais métodos de análise de tensões residuais na Inglaterra durante o ano de 1998¹⁶.

Algumas diferenças entre os principais métodos de análise das tensões residuais podem ser encontradas em Hauk⁵, Lu⁶ e Fry¹⁶.

2.2 Determinação das Tensões Residuais pelo Método do Furo Cego

O Método do Furo Cego é uma técnica experimental popular e muito utilizada para a análise das tensões residuais em componentes mecânicos^{6,26}.

É baseado no princípio de equilíbrio de tensões residuais, ou seja, quando removemos parte de um material, ocorre uma alteração no estado de tensões. Como consequência, o material se deforma para atingir novamente o equilíbrio⁶.

O procedimento padrão se baseia na medida da deformação produzida pela relaxação e redistribuição das tensões residuais induzida pela usinagem de um pequeno furo na superfície do material²⁷⁻³⁴. Normalmente extensômetros de resistência elétrica (ERE) especiais são utilizados para medir as deformações na superfície da amostra^{6,27,35}.

2.2.1 Histórico e Desenvolvimento

O Método do Furo data do trabalho pioneiro de Mathar (1934) o qual utilizou um extensômetro mecânico para a medida das deformações decorrentes do alívio de tensões nas vizinhanças de um furo passante em uma chapa fina de um material contendo tensões residuais. Soete e Vancrombrugge (1950) obtiveram grande melhoria na precisão do método, através da utilização de extensômetros de resistência elétrica para a medida das deformações ao invés do extensômetro mecânico. Kelsey publicou a primeira investigação da variação das tensões residuais com a profundidade através do Método do Furo em 1956. Kelsey também foi o primeiro a utilizar o furo cego ao invés do furo passante^{6,35}.

As aplicações modernas do Método do Furo datam do trabalho de Rendler e Vigness (1966). Eles desenvolveram o Método do Furo Cego num procedimento sistemático e reprodutível e também definiram a geometria dos extensômetros tipo roseta estabelecida na norma ASTM E 837 (Figura 2.10, onde: D_m é o diâmetro médio da roseta, D_f é o diâmetro do furo, σ_{max} e σ_{min} são as tensões residuais principais máximas e mínimas, β é o ângulo principal, ângulo da tensão residual principal máxima, no sentido anti-horário a partir do ERE 1, L-ERE e C-ERE representam a largura e o comprimento dos extensômetros de resistência elétrica, respectivamente)^{6,35,36}.

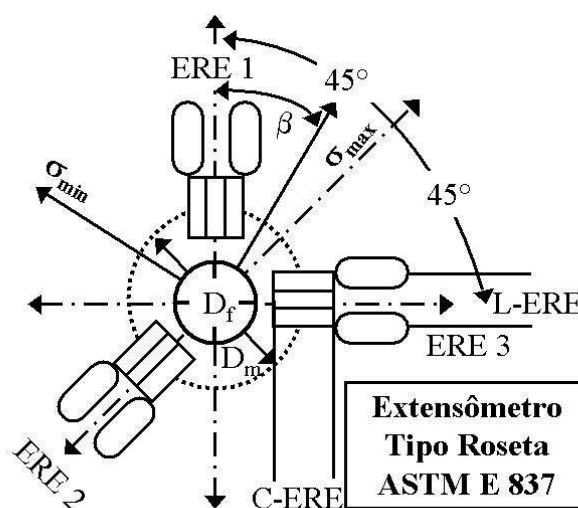


Figura 2.10: Geometria do extensômetro tipo roseta definida pela norma ASTM E 837³⁶.

Bizark e Zochowski⁶ foram os primeiros a descreverem um método reprodutível para a medida das tensões residuais não uniformes em 1978.

Em 1981, Schajer³⁷ apresentou a calibração por elementos finitos para o cálculo das tensões residuais.

Flaman³⁸ utilizou a turbina de alta velocidade pela primeira vez em 1982.

Schajer²⁶, em 1988, apresentou os métodos da Integral e das Séries de Potências, destinados ao cálculo das tensões residuais distribuídas de maneira não uniforme com a profundidade.

Em 1993, Kockelmann³⁹ apresentou um método alternativo para o cálculo das tensões residuais distribuídas de maneira não uniforme com a profundidade, através da utilização de dados experimentais para a calibração. Neste mesmo ano, a empresa Micro Measurements lançou a Nota Técnica TN-503-4, indicando um procedimento básico para a determinação das tensões residuais uniformes em componentes mecânicos^{29,40}.

Por volta de 1994, foi apresentada a técnica que associava o Método do Furo Cego com a medida holográfica das deformações decorrentes da relaxação e redistribuição das tensões residuais^{41,42}.

Atualmente, os estudos estão direcionados para o aumento da precisão do método, assim como, para a sua utilização em diversas áreas da engenharia.

Schajer e Tootonian²⁸ apresentaram em 1997 um novo design de extensômetro tipo roseta utilizando seis extensômetros de resistência elétrica ao invés dos três utilizados no extensômetro normalizado. Neste caso, os extensômetros estão dispostos três a três nas direções radial (R) e circunferencial (C) como mostra a Figura 2.11.

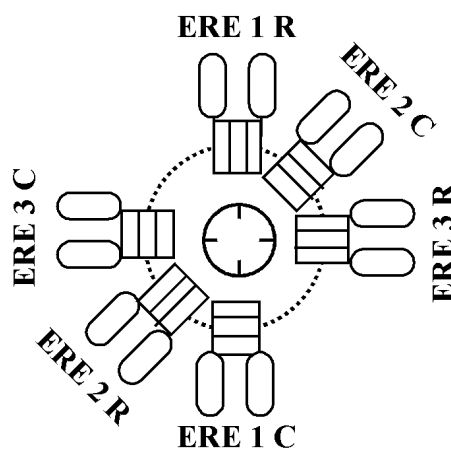


Figura 2.11: Extensômetro tipo roseta de seis extensômetros de resistência elétrica²⁸.

Este modelo combina a sensibilidade à resposta da deformação na superfície, através da utilização dos extensômetros radiais, com a resposta aos efeitos no interior do material, melhor medidos pelos extensômetros circunferenciais. Utilizando-se este tipo de extensômetro, consegue-se um aumento na sensibilidade do método à medida de deformação de aproximadamente 2,3 vezes quando comparado ao modelo normalizado. A sensibilidade à profundidade máxima também será aumentada em 1,3 vezes com esta roseta²⁸.

Roldo⁴³ utilizou o Método do Furo Cego para a análise das tensões residuais geradas em trilhos ferroviários, desenvolvendo um procedimento sistemático para a localização da zona onde estão concentradas as máximas tensões residuais trativas no componente. Sendo que esta área é o local preferencial para a nucleação e propagação de defeitos⁴³.

Honner et al⁴⁴ utilizaram a técnica termográfica para a medida da variação de temperatura durante a usinagem do furo. Os autores concluíram que o efeito da deformação térmica é minimizado se a medida for realizada num intervalo de tempo suficiente entre o passe de usinagem e a medida das deformações aliviadas.

2.2.2 Princípios Físicos

O Método do Furo Cego é relativamente simples, rápido, barato e versátil^{6,35,45}. Neste método, um pequeno furo é usinado na superfície do componente contendo tensões residuais. A deformação na superfície, decorrente do alívio de tensões residuais, devido a introdução deste furo, é medida através de extensômetros de resistência elétrica especialmente desenvolvidos (Figura 2.10)³⁵. A Figura 2.12 mostra a geometria deste ensaio onde D_m é o diâmetro médio do extensômetro tipo roseta, D_f é o diâmetro final do furo, Z é a profundidade de uma dado incremento e h é a profundidade final do furo³⁵.

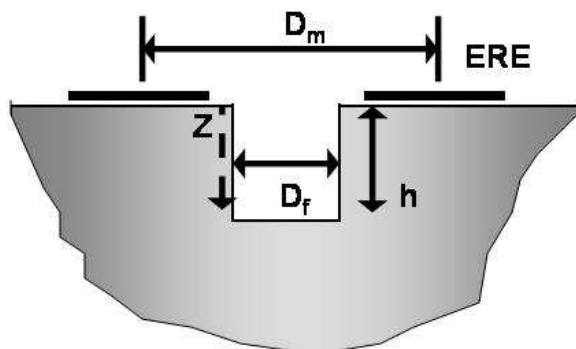


Figura 2.12: Relação entre as dimensões do extensômetro e as dimensões do furo para o Método do Furo Cego³⁵.

A deformação medida cai rapidamente com a distância a partir do início do furo. Deste modo, os extensômetros medem deformações referentes a um valor entre 25 e 40% do efeito das tensões residuais presentes na localidade do furo⁶.

As tensões residuais nas vizinhanças do furo não são completamente aliviadas, portanto, não é possível se utilizar diretamente a lei de Hooke e o método necessita de calibração experimental ou computacional⁶.

A resolução do método é de $0,5 D_m$, seguindo o princípio de St. Venant, o qual diz que a resposta de deformação da superfície se torna rapidamente insensível aos efeitos das tensões no interior do componente a medida que se aumenta a distância da medida até a superfície^{27,28}.

O procedimento indicado para a determinação das tensões residuais uniformes segue a norma ASTM E 837³⁶, onde o furo cego é usinado em apenas um passe. Para o caso das tensões residuais não uniformes, o furo deve ser usinado em vários incrementos, espaçados de maneira controlada, onde a deformação é medida após cada um destes^{6,26,35,39}.

Flaman et al⁴⁶ simularam por elementos finitos a usinagem de um furo de 1,6 mm de diâmetro em sete incrementos igualmente espaçados de 0,25 mm. As tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} foram consideradas constantes para cada incremento, simulando a variação média uniforme de tensões através de cada incremento. Os resultados estão apresentados na Figura 2.13.

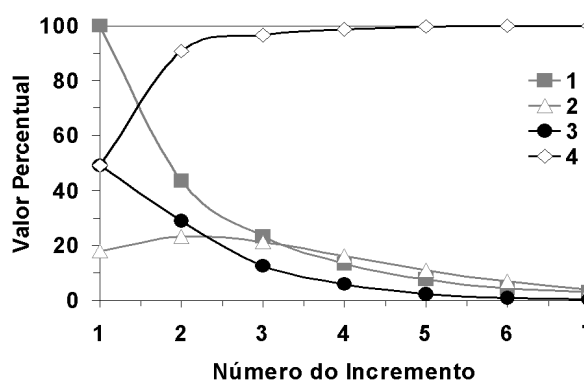


Figura 2.13: Resultados da variação de deformação por incremento durante a simulação usinagem de um pequeno furo na superfície de um componente⁴⁶.

Na Figura 2.13, a curva (1) refere-se ao percentual de deformação no incremento devido às tensões na profundidade deste incremento; a curva (2) refere-se a deformação total percentual que a ocorre quando se usina este incremento; a curva (3) refere-se a contribuição

total da deformação para o cálculo das tensões para cada incremento específico; e a curva (4) se refere à contribuição percentual cumulativa da deformação em cada incremento⁴⁶.

Percebe-se que a deformação medida decresce, com exceção do primeiro, para cada incremento. Mais interessante é a contribuição de cada incremento para a deformação total aliviada na superfície. A influência das tensões residuais em um incremento próximo à superfície é predominante na variação total de deformação quando comparados com os incrementos mais distantes⁴⁶. As tensões residuais no primeiro incremento contam para quase 50% da deformação total. Os autores concluíram que a habilidade de determinar as tensões residuais cai rapidamente a medida que se aumenta a profundidade do furo⁴⁶.

Rendler e Vignes²⁹ observaram que a precisão do Método do Furo Cego, para aplicações em campo, será diretamente relacionada com a habilidade do operador em posicionar a broca precisamente no centro do extensômetro tipo roseta. Estudos recentes mostram que para uma excentricidade de 0,025 mm, o erro associado é inferior a 3%. Quando a excentricidade é maior, o erro pode alcançar de 20 a 30 % dos valores medidos, provando que a calibração do equipamento deve ser efetuada periodicamente⁴⁷. Outro fator importante a se considerar é que a excentricidade varia em função da profundidade do furo onde para furos de até 2 mm, deve-se buscar sua completa eliminação. Porém, quando furos de 4 mm ou mais são usinados a excentricidade é uma característica inerente ao procedimento⁴³.

2.2.3 Procedimentos

A medida das tensões residuais através do Método do Furo Cego se baseia, basicamente, nos sete passos, a seguir^{6,29,35,36}:

1. Instalação dos extensômetros de resistência elétrica;
2. Montagem do equipamento de medição;
3. Posicionamento do equipamento de usinagem do furo;
4. Determinação da profundidade zero;
5. Calibração e zeragem dos Extensômetros;
6. Usinagem incremental do furo e medida das deformações;
7. Cálculo das tensões residuais.

A instalação dos extensômetros deve ser cuidadosa o suficiente para evitar a introdução de tensões residuais adicionais no componente, evitando assim a redução da confiabilidade do método.

Prévey⁴⁷ estudou o efeito de diferentes procedimentos de preparação da superfície para a colagem dos ERE para medidas de tensões residuais pelo método do furo. Este autor utilizou uma amostra recozida do aço AISI 1018 ($\sigma_e = 300$ MPa), onde a superfície foi preparada por cinco métodos diferentes:

1. Lixamento com lixa abrasiva de malha 400 seca;
2. Lixamento com lixa abrasiva de malha 220 úmida;
3. Lixamento com lixa abrasiva de malha 400 úmida;
4. Ataque químico com Nital;
5. Lixamento com lixa abrasiva de malha 120 seca.

Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 2.2 .

Tabela 2.2: Resumo da distribuição das tensões residuais produzidas pela preparação da superfície do aço 1018 para a colagem de ERE⁴⁷.

Preparação da Superfície	MTR max	MTR min	Ângulo principal	Profundidade [μm]
1	-123	-206	0 - 5	20
2	-143	-270	70 - 90	40
3	-230	-265	0 - 45	20
4	43	-54	4	0
5	202	-176	0 - 15	60

Percebe-se que os processos de lixamento mecânicos são os mais severos ao campo de tensões residuais. Porém, são também os processos mais práticos de preparação da superfície para colagem dos ERE^{29,47,48}.

Atualmente existem diversos equipamentos para a usinagem de pequenos furos em componentes mecânicos^{6,35}.

Boag et al⁴⁹ estudaram a influência dos sistemas de usinagem na medida das tensões residuais introduzidas em amostras recozidas de diversos materiais de engenharia. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Tensões residuais (em MPa) medidas durante diferentes processos de usinagem de furos pelo método do furo⁴⁹.

	σ_e *	Alta Velocidade	Baixa Velocidade	Abrasão de Ar	Ataque Eletroquímico
Alumínio	100	9	$> \sigma_e$	5	5
Aço Carbono	210	1	136	3	6
Aço Inox	240	9	$> \sigma_e$	7	9
Cobre	70	22	$> \sigma_e$	$> \sigma_e$	14
Titânio	480	13	63	3	-
Zircônio	340	5	46	3	-

* Valores aproximados para amostras recozidas.

Através deste estudo, os autores constataram que a usinagem realizada através da abrasão de ar não é indicada para materiais dúcteis e que a turbina de alta velocidade, apesar de ser o método que induz as menores tensões, não é indicado para materiais de alta dureza⁴⁹. Isto ocorre por que o torque de corte deste equipamento é muito baixo. A turbina pode parar durante a usinagem de materiais muito duros. Na verdade, a usinagem só é possível devido a alta velocidade de rotação deste componente^{6,35,38}. Outra observação importante é a forma dos furos produzidos por cada equipamento. A Figura 2.14 apresenta uma visão esquemática da geometria típica dos furos produzidos por diferentes processos de usinagem, para a determinação das tensões residuais através do Método do Furo Cego. Onde o furo (A) corresponde a um furo usinado com a turbina de alta velocidade; o furo (B) corresponde a um furo usinado com uma furadeira de baixa rotação; o furo (C) corresponde a um furo usinado com o sistema de abrasão a ar; e o furo (D) corresponde a um furo usinado através do ataque eletro-químico. Percebe-se que o furo (A) foi o que apresentou a maior uniformidade geométrica.

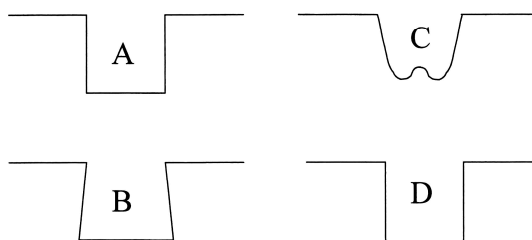


Figura 2.14: Geometrias típicas dos furos desenvolvidos por diferentes métodos de usinagem para o Método do Furo Cego³⁴.

É importante salientar que falhas no alinhamento alteram a forma dos furos e geram erros significativos nas medidas³⁵.

Erros na determinação da profundidade zero podem deslocar a posição da distribuição de tensões residuais, alterando os resultados^{45,51}.

2.2.4 Cálculo das Tensões Residuais

O cálculo das tensões residuais uniformes pode ser realizado segundo os procedimentos indicados pela norma ASTM E 837 ou pela TN-503-04. Para o cálculo das tensões residuais não-uniformes, outros métodos foram desenvolvidos, sendo os principais: O Método da Integral, o Método de Kockelmann e o Método das Séries de Potências, descritos a seguir.

Método da Integral

O Método da Integral foi introduzido por Schajer²⁶ em 1988 como um método mais adequado para o cálculo das tensões residuais que variam com a profundidade de maneira não uniforme^{6,26,35,50}. Este método reconhece que a deformação medida durante a usinagem do furo é cumulativa, resultante do alívio de tensões residuais em todas as localidades do furo até a profundidade final. Este método atua identificando todas as contribuições individuais de tensões para a deformação total^{6,26}.

O princípio básico deste método é que uma distribuição de tensões residuais arbitrária pode ser decomposta em componentes de tensão equibiaxial e cisalhante. Schajer mostrou que a relação entre as tensões residuais originais e a deformação radial aliviada pode ser escrita da forma indicada na Equação 2.4:

$$\varepsilon_r(Z) = \frac{1+\nu}{2E} \int_0^z a(Z, h) \sigma_{eq}(Z) dZ + \frac{1}{2E} \int_0^z b(Z, h) \sigma_C(Z) \cos(2\beta(Z)) dZ \quad (2.4)$$

Onde:

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

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

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

Pode-se decompor a Equação 2.4 na forma indicada pela Equação 2.5.

$$(\varepsilon_r)_i = \frac{1+\nu}{2E} \sum_{j=1}^{j=i} a_{ij} (\sigma_{\max} + \sigma_{\min})_j + \frac{1}{2E} \sum_{j=1}^{j=i} b_{ij} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})_j \cos(2\beta_j) \quad (2.5)$$

Com $1 \leq j \leq i \leq n$; para n se referindo ao número de incrementos usinados e j ao número do incremento no qual a tensão está agindo.

Esta equação pode ser transformada para a Equação 2.6, referente à notação matricial:

$$\{\varepsilon_r\} = \frac{1+\nu}{2E} [a] \{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}\} + \frac{1}{2E} [b] \{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cos 2\beta\} \quad (2.6)$$

As matrizes $[a]$ e $[b]$ são matrizes triangulares inferiores contendo os componentes a_{ij} e b_{ij} respectivamente. Uma demonstração da influência de cada incremento para o cálculo destes componentes pode ser visualizada na Figura 2.15, a seguir. Esta figura se refere à contribuição de cada incremento para o cálculo da matriz dos elementos de $[a]$. Os elementos da matriz $[b]$ podem ser calculados da mesma maneira^{4,35}.

O Método da Integral considera que as tensões residuais variam linearmente no interior de cada incremento. As constantes de calibração desenvolvidas para este método foram calculadas por elementos finitos, simulando-se um estado de tensões residuais não uniformes^{6,26,35,50}. Este é um método extremamente sensível aos erros de alinhamento e medida das deformações e é indicado para o cálculo das tensões residuais não uniformes que apresentam grande variação com a profundidade^{6,26,35}.

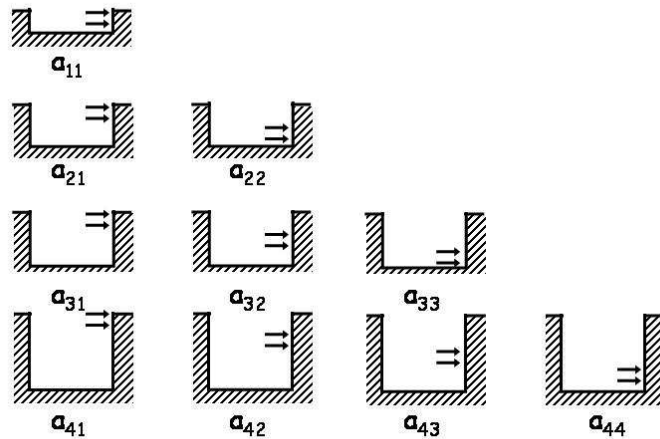


Figura 2.15: Obtenção dos coeficientes a_{ij} através da usinagem incremental de um furo na superfície de um componente mecânico⁶.

Método de Kockelmann

O Método de Kockelmann³⁹ foi apresentado por Kockelmann, em 1993, como uma opção para o cálculo das tensões residuais não uniformes, que apresentam grande variação com a profundidade, utilizando dados experimentais de calibração^{39,51}.

A calibração é efetuada uma vez, através da usinagem de um pequeno furo em um corpo de prova, contendo um estado conhecido de tensões residuais não uniformes, sujeito ao carregamento uniaxial. As deformações na direção de carregamento (ε_x) e na direção perpendicular (ε_y) são registradas a cada passe.

Para estes resultados, as funções de calibração $K_x(\xi)$ e $K_y(\xi)$ (Equação 2.7) são calculadas considerando-se as constantes elásticas do material e o carregamento uniaxial (σ) através da simulação numérica, onde ξ corresponde a razão entre a profundidade do incremento e o diâmetro final do furo.

$$K_x(\xi) = \frac{E}{\sigma} \frac{d\varepsilon_x(\xi)}{d\xi} \text{ e } K_y(\xi) = -\frac{E}{\nu\sigma} \frac{d\varepsilon_y(\xi)}{d\xi} \quad (2.7)$$

As tensões residuais atuando na direção de cada ERE são obtidas através das Equações 2.8–2.10:

$$\sigma_a(\xi) = \frac{E}{(K_x(\xi))^2 - \nu^2 (K_y(\xi))^2} \left[K_x(\xi) \frac{d\varepsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_y(\xi) \frac{d\varepsilon_c(\xi)}{d\xi} \right] \quad (2.8)$$

$$\sigma_b(\xi) = \frac{E}{(K_X(\xi))^2 - \nu^2(K_Y(\xi))^2} \left[K_X(\xi) \frac{d\epsilon_a(\xi)}{d\xi} + \nu K_Y(\xi) \left(\frac{d\epsilon_a(\xi)}{d\xi} + \frac{d\epsilon_b(\xi)}{d\xi} - \frac{d\epsilon_c(\xi)}{d\xi} \right) \right] \quad (2.9)$$

$$\sigma_c(\xi) = \frac{E}{(K_X(\xi))^2 - \nu^2(K_Y(\xi))^2} \left[K_X(\xi) \frac{d\epsilon_c(\xi)}{d\xi} + \nu K_Y(\xi) \frac{d\epsilon_a(\xi)}{d\xi} \right] \quad (2.10)$$

A Figura 2.16, apresenta uma representação gráfica deste método.

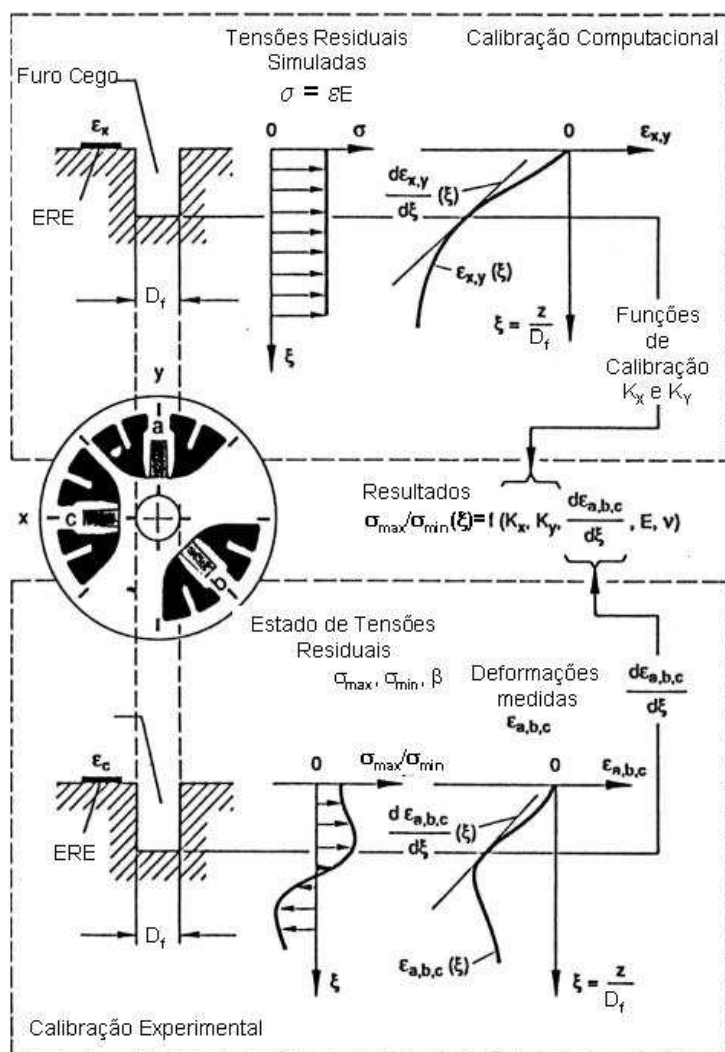


Figura 2.16: Diagrama mostrando os princípios das calibrações computacional e experimental para o Método do Furo de análise das tensões residuais³⁹.

Através da relação estipulada pelo Circulo de Mohr de tensões, as tensões principais σ_{\max} e σ_{\min} podem ser obtidas, assim como o ângulo principal. Os resultados estão representados nas Equações 2.11 e 2.12, respectivamente:

$$\frac{\sigma_{\max}(\xi)}{\sigma_{\min}(\xi)} = \frac{\sigma_a(\xi) + \sigma_b(\xi)}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_a(\xi) - \sigma_b(\xi))^2 + (\sigma_c(\xi) - \sigma_b(\xi))^2} \quad (2.11)$$

$$\beta(\xi) = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sigma_b(\xi) - \sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)}{\sigma_a(\xi) - \sigma_c(\xi)} \quad (2.12)$$

O este método apresenta resultados semelhantes aos resultados obtidos para o cálculo das tensões residuais não uniformes, realizado através do Método da Integral.

O Método de Kockelmann apresenta adicionalmente uma menor dependência aos erros de instrumentação e medidas de deformação, uma vez que é impossível se simular numericamente todas as condições do ensaio e dos materiais. Deste modo, a calibração experimental apresenta maior representatividade na determinação do perfil de tensões residuais presente nos componentes mecânicos^{39,51}.

Método das Séries de Potências

Introduzido por Schajer²⁶, juntamente com o Método da Integral em 1988, o Método das Séries de Potências é uma aproximação, mas teoricamente aceitável, para o cálculo das tensões residuais não uniformes^{6,26,35,51}.

Neste método, o campo de tensões residuais é dividido em séries polinomiais de potência, tais como mostra a Equação 2.13:

$$\sigma_{TR}(Z) = P_0 + P_1Z + P_2Z^2 + P_3Z^3 + \dots + P_nZ^n \quad (2.13)$$

Onde Z é a distância da superfície até o incremento em questão. Infelizmente, o método só fornece resultados confiáveis quando se utilizam apenas os dois primeiros termos da série (Equação 2.14), sendo que o primeiro termo representa a distribuição de tensões residuais uniforme e o segundo a distribuição de tensões residuais variando linearmente com a profundidade a partir da superfície. As constantes de calibração também são calculadas por elementos finitos neste caso. As vantagens deste método são a menor sensibilidade aos erros de medida das deformações e a possibilidade de se extrapolar os resultados para profundidades maiores (aproximadamente iguais ao diâmetro do furo)^{6,25,35}.

$$\sigma_{TR}(Z) = P_0 + P_1Z \quad (2.14)$$

Como para este método a sensibilidade aos erros nas medidas de deformação é reduzido, o furo pode ser usinado em um grande número de incrementos a fim de se obter uma melhor representatividade dos resultados^{6,26,35}.

2.2.5 Outras observações sobre o Método do Furo Cego

Além dos procedimentos e conceitos estipulados anteriormente, é importante levar em consideração que:

- 1) O Método do Furo Cego é indicado para a determinação das tensões residuais inferiores a 60% do limite de escoamento do material²⁹.
- 2) Quando as tensões residuais iniciais estão próximas do limite de escoamento do material, o concentrador de tensões causado pela presença do furo pode induzir o escoamento localizado da região, relaxando as tensões residuais^{29,30}.
- 3) De acordo com Beaney⁵², um erro de 15% pode ser esperado quando a magnitude de tensões residuais for superior a 70% do limite de escoamento. Erros de 20% podem ser esperados quando as tensões residuais apresentam valores próximos a 90% do limite de escoamento do material³⁰⁻³⁴.
- 4) A sensibilidade ao erro e a limitação da profundidade às tensões residuais não uniformes são limitações do método e não provenientes dos procedimentos de cálculo⁶.
- 5) As constantes de calibração para todos os métodos são calculadas assumindo que o material é homogêneo. Quando isto não ocorre (para materiais endurecidos, por exemplo) um decréscimo na precisão do método pode ser esperado²⁶.
- 6) A abrasão excessiva da superfície da amostra para a instalação dos extensômetros pode resultar em fontes significantes de erros experimentais⁴⁷.
- 7) Quando a tensão equivalente de von Mises é maior que 50% do limite de escoamento do material, pode ocorrer a plastificação localizada nas vizinhanças do furo gerando erro nas medidas de deformação e conseqüentemente no cálculo das tensões residuais presentes^{33,34}.
- 8) A máxima profundidade de relaxação de deformação medida depende do diâmetro médio do extensômetro tipo roseta, onde o diâmetro do furo influencia na magnitude da deformação medida, desde que a forma da curva deformação contra profundidade é qualitativamente determinada por D_m e quantitativamente determinada por D_f . (Figura 2.12)²⁶.

9) O estado de tensões residuais fora da vizinhança do furo não afeta a deformação medida²⁷. Contudo, recomenda-se que a distância média entre furos adjacentes seja de pelo menos seis vezes o diâmetro do furo³⁵.

10) Devido ao volume relativamente grande de material removido, o Método do Furo Cego é sensível apenas a medida das macrotensões residuais^{6,26,35}.

11) A habilidade do operador foi identificada como sendo, provavelmente, o parâmetro mais importante para o alcance de medidas de qualidade e reprodutibilidade das tensões residuais pelo Método do Furo Cego³⁵.

2.3 Determinação das Tensões Residuais pelo Método Micromagnético

A análise das tensões residuais através do Método de Difração de raios X é uma técnica bem desenvolvida e amplamente utilizada. Porém, como desvantagem, o tempo de medida limita seu uso a uma amostragem aleatória e, às vezes, de baixa representatividade. Do mesmo modo, a velocidade de análise do Método do Furo Cego é contra-balanceada pela desvantagem de ser este um método semi-destrutivo onde um mesmo ponto não pode ser analisado duas vezes. Assim, é de grande interesse para a indústria moderna o desenvolvimento de métodos não-destrutivos, com grande velocidade, fácil aplicação e boa sensibilidade como o Método Micromagnético. Este método é atualmente uma das técnicas magnéticas mais populares para a medida das propriedades dos materiais ferromagnéticos tais como, tamanho de grão, tipo de microestrutura, profundidade de camada endurecida, tensões residuais, dureza, entre outras^{5,6,53}.

2.3.1 Princípios Físicos

O método micromagnético é baseado num conceito contraditório, a primeira vista, de que a curva de histerese de um material ferromagnético não varia de forma contínua e que esta variação não é constante com as características microestruturais do material. Microscopicamente, o processo de magnetização de um material ferromagnético ocorre por dois processos:

1) À medida que um campo magnético crescente alternado é aplicado no material, ocorre o crescimento dos domínios magnéticos que possuem momentos magnéticos orientados na mesma direção do campo aplicado até se obter dois domínios magnetizados na mesma direção, porém com sentidos contrários;

2) O segundo estágio seria a rotação dos vetores dos domínios magnéticos restantes até que estes possuam o mesmo sentido^{5,6,54-57}.

O primeiro processo ocorre a baixos campos magnéticos e é caracterizado pelo movimento das paredes de domínio magnético. O segundo processo ocorre em campos de alta intensidade, pois necessitam de um acréscimo de energia para orientar o domínio magnético a uma direção diferente da direção de fácil magnetização do cristal, como pode ser visto na Figura 2.17, onde M é a magnetização remanescente, H é a intensidade do campo magnético aplicado e PR são os processos de rotação de momento dos domínios magnéticos.

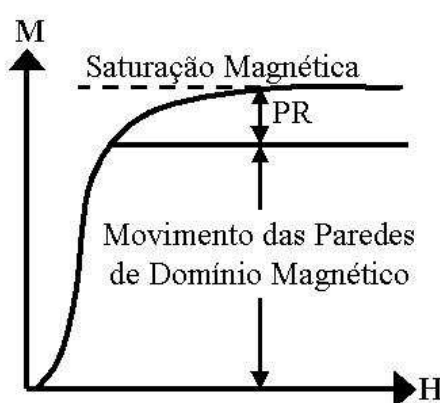


Figura 2.17: Curva de magnetização de um material ferromagnético⁵⁷.

Em 1919, Barkhausen constatou que os movimentos das paredes de domínio magnético são a origem das discontinuidades na curva de histerese de um material ferromagnético. Este provou que estas discontinuidades podem induzir um ruído detectável na forma de um pulso de voltagem em uma bobina indutora posicionada na superfície do material, sendo este ruído chamado de ruído ou sinal Barkhausen em sua homenagem^{5,6,53,55}.

Desde que o ruído Barkhausen resulte diretamente do movimento abrupto das paredes de domínio, a configuração original do domínio magnético tem grande influência na geração do sinal^{57,58}.

A mobilidade das paredes de domínio está relacionada com a energia magnetoelástica total, que varia com o tamanho, forma e microestrutura do material, sendo fortemente influenciada pela estrutura de defeitos, tais como vazios, inclusões, discordâncias, contornos de grão e pela presença de tensões residuais^{57,59}. Estas heterogeneidades estruturais atuam como barreiras à movimentação das fronteiras dos domínios, fazendo com que seu movimento

seja realizado aos saltos e não de forma contínua. Estes saltos têm como consequência a mudança súbita e localizada na magnetização do material, dando origem ao sinal Barkhausen^{54,57,60}.

A Figura 2.18 demonstra a visão micromagnética do laço de histerese de um material ferromagnético, onde (B) é a indução magnética e (H) a intensidade do campo magnético externo aplicado. Cada linha vertical nos degraus representa o movimento discreto de um conjunto de fronteiras de domínios magnéticos de uma barreira de energia para a outra. Cada linha horizontal representa o tempo de espera (ou em outras palavras, a barreira de energia a ser ultrapassada) antes que o próximo movimento ocorra⁶¹.

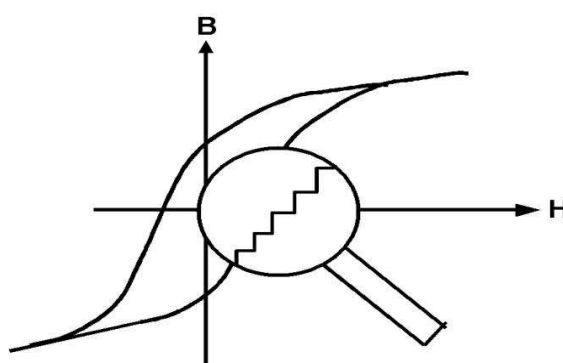


Figura 2.18: Representação da Curva de Histerese para um material ferromagnético⁶.

Esta figura explica porque materiais endurecidos ou contendo altos valores de tensões residuais compressivas apresentam curvas de histerese largas. Este efeito ocorre porque existe uma maior barreira de energia a ser ultrapassada para que ocorra um dado movimento de um conjunto de paredes de domínios magnéticos durante o processo de magnetização. As tensões residuais atuando no mesmo sentido do campo magnético aplicado reduzem a taxa de crescimento dos domínios magnéticos. A mesma analogia pode ser utilizada para explicar o fato de que materiais de baixa dureza ou que apresentem altos níveis de tensões residuais atuando no sentido oposto do campo magnético externo aplicado apresentam curvas de histerese mais estreitas. Deste modo, parâmetros micromagnéticos podem ser utilizados para determinar as características microestruturais dos materiais ferromagnéticos^{5,6,58-61}.

2.3.2 Análise do Sinal Barkhausen

Para aplicações práticas, o nível do sinal Barkhausen pode ser quantificado de várias formas. Este pode ser expresso em termos da máxima amplitude do sinal magnético

Barkhausen (M_{\max}), pelo valor médio quadrático do sinal ou pela quantidade de energia liberada na emissão do sinal⁶². Visto que neste trabalho o sinal utilizado foi o M_{\max} , apenas este será considerado.

É importante verificar a dependência do Sinal Barkhausen com o estado de tensões residuais e com as características microestruturais dos materiais ferromagnéticos. Isto pode ser observado na Figura 2.19, onde nota-se que a presença de tensões residuais compressivas no material produz um laço de histerese largo e baixos valores para a amplitude do sinal Barkhausen, devido à imposição ao crescimento dos domínios magnéticos efetuada por estas tensões. O efeito é inverso para o caso da presença de tensões residuais trativas na superfície do material, apresentando este um laço de histerese estreito e altos níveis de amplitude para o sinal Barkhausen.

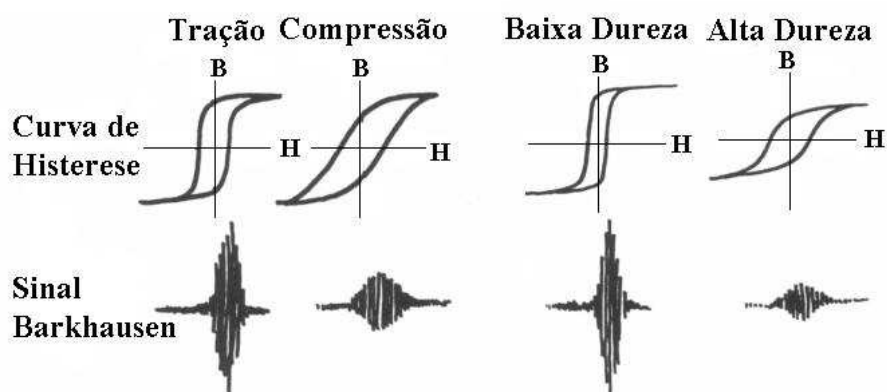


Figura 2.19: Influência do estado de tensões residuais e da dureza na curva de Histerese e na amplitude do sinal Barkhausen⁶².

Porém, percebe-se que o efeito é semelhante para materiais endurecidos, onde a densidade de discordâncias tem o mesmo efeito das tensões residuais compressivas no material. Desta forma, deve-se buscar a utilização de um parâmetro de medida adicional capaz de separar os efeitos microestruturais da influência do estado de tensões residuais presentes no material. Isto se torna possível através da medida da coercitividade relativa à amplitude máxima do sinal Barkhausen (H_{cm}), ou seja, a intensidade do campo magnético onde a máxima amplitude do sinal Barkhausen é registrada⁶². A coercitividade apresenta baixa variação com o estado de tensões. Porém, as variações microestruturais causam mudanças significativas na localização do sinal magnético de máxima amplitude, ou seja, na coercitividade⁶². Assim, o estado de tensões e as características microestruturais podem ser determinados e separados através da medida conjunta de M_{\max} e H_{cm} ^{5,6}.

2.3.3 Instrumentação

O sistema de medição inclui uma fonte excitadora e uma bobina detectora para detectar o sinal magnético gerado. Normalmente, estas peças apresentam-se no mesmo componente como mostra a Figura 2.20.

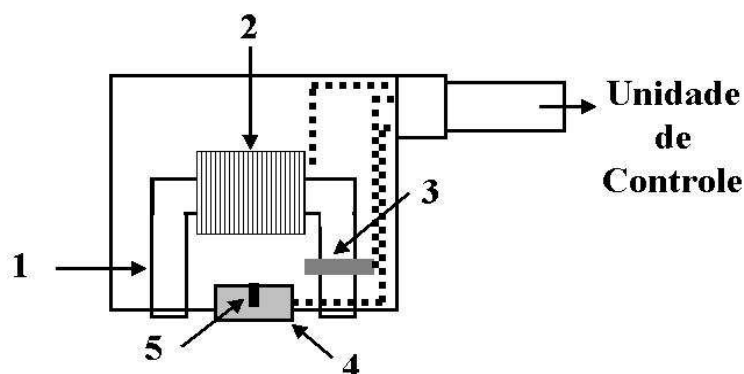


Figura 2.20: Configuração do sensor magnético utilizado no Método Micromagnético⁶¹.

Onde: (1) corresponde ao núcleo da unidade de magnetização, (2) corresponde a bobina de excitação da unidade de magnetização, (3) corresponde ao detector de fluxo magnético, (4) é a bobina sensora e (5) o núcleo ferromagnético desta bobina. A geometria deste sensor depende da forma e do tamanho do componente, visto que as três peças devem manter o contato total com a superfície do componente e a área do detector determina a área da medida do sinal magnético adquirido. Para a determinação do volume analisado, é preciso determinar a profundidade analisada através do método micromagnético e a variação dos parâmetros medidos com a profundidade^{5,6,57-62}.

Primeiramente, é importante lembrar que um material será magnetizado até o ponto de saturação em uma dada velocidade determinada pela frequência de excitação (f_H) e da intensidade do campo magnético aplicado (H_{max}).

Silva Jr.⁶¹ testou a influência da frequência de excitação na sensibilidade do método utilizando duas frequências de 10 e 100 Hz, constatando que a frequência de 100 Hz é mais sensível a baixos valores de tensões do que a frequência de 10 Hz.

Campos magnéticos alternados de 100 A/cm de intensidade são indicados na literatura como bons valores para as medidas micromagnéticas^{5,61-64}.

À medida que penetra no material, o campo magnético é atenuado devido às perdas por histerese e por correntes parasitas (em geral esta atenuação se dá de forma exponencial).

Do mesmo modo, o sinal gerado terá sua frequência atenuada em função da distância ao detector. Desta forma, a frequência do sinal magnético gerado pode ser utilizada para determinar a profundidade da qual este provém. Assim, a frequência de análise (f_A), a qual pode ser variada através da utilização de vários filtros de corte, é o fator mais importante para a determinação da profundidade das tensões residuais através do método micromagnético^{5,6,53,60-67}.

A Figura 2.21 demonstra o que foi descrito acima. Visto que o sinal é atenuado a medida que aumenta a distância entre a posição de origem do sinal e o detector, a utilização de um dado filtro de frequência de análise pode ser utilizado para determinar a profundidade de pele (δ) da qual provem o sinal magnético.

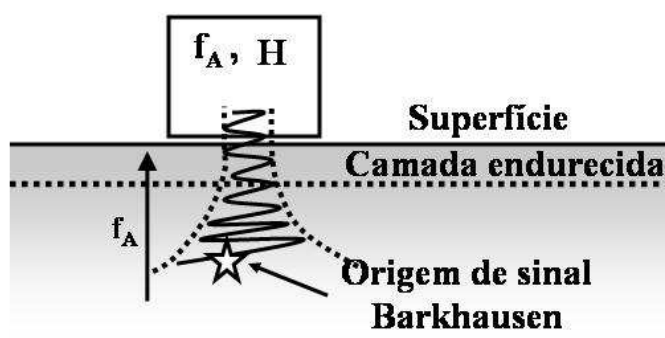


Figura 2.21: Princípio da medida do sinal Barkhausen em função da profundidade⁶⁶.

A profundidade de pele pode ser calculada pela Equação 2.15^{5,61,62}:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi * f_A * C_{elétrica} * \mu_0 * \mu_r}} \quad (2.15)$$

Onde: f_A é a frequência de análise em Hz, $C_{elétrica}$ é a condutividade elétrica em $\Omega^{-1} m^{-1}$, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo: $4\pi \times 10^{-7} Hm^{-1}$ e μ_r é a permeabilidade relativa do material analisado.

O sinal magnético gerado durante o processo de magnetização, em geral, é amplificado na frequência de medida na faixa de 0,7 a 200 kHz e filtrado antes de ser armazenado sobre o meio ciclo de histerese para a análise digital posterior. A seguir um filtro de frequência de corte é utilizado para eliminar as interferências devido a magnetização de baixa frequência (ruído de fundo de escala) e para selecionar o intervalo de frequência desejado^{61,62,67}.

Como nesta medida estamos interessados apenas no M_{\max} e como o sinal é atenuado a medida que cresce a profundidade de sua proveniência, podemos assumir que a frequência do sinal M_{\max} gerado é idêntica a frequência do filtro de corte, fazendo desta, uma medida pontual das propriedades micromagnéticas⁵³.

Além destas frequências, devem-se variar as características de amplificação e desamplificação para tornarmos o sinal mensurável na escala de voltagem do equipamento (em geral de 0 a 10 V)⁶³.

2.3.4 Características do Método

O Método Micromagnético é uma técnica rápida, simples e de fácil aplicação, utilizada para a determinação das tensões residuais em materiais ferromagnéticos^{4-6,58,61};

Em geral, se a microestrutura é controlada, a dureza e a distribuição das tensões residuais podem ser avaliadas através da medida de M_{\max} e H_{cm} ^{5,6,58,61};

O método é indireto, deste modo, faz-se necessária a utilização de uma etapa de calibração, para relacionar os parâmetros micromagnéticos com o estado de tensões residuais do material. Esta calibração pode ser realizada através de ensaios mecânicos ou através de outros métodos de determinação das tensões residuais, tais como, o Método de Difração de raios X e/ou o Método do Furo^{5,6,58,61,62,64}.

O método é aplicável à medida conjunta das macro e microtensões residuais. Se as macrotensões estão presentes em um componente, as paredes de domínio dentro do grão sofrerão efeito apenas do campo de tensões atuando dentro do grão (como se fosse um cristal único). Isto significa que apenas o estado de microtensões é responsável pelo arranjo das paredes de domínio magnético. As microtensões influenciarão o arranjo do domínio magnético de modo que os valores médios das microtensões nos dão uma caracterização do campo de tensões residuais atuando no componente. Deste modo, as macrotensões apenas podem ser medidas através da calibração dos parâmetros micromagnéticos de acordo com a característica do campo magnético, do campo de tensões e as dimensões apropriadas do sensor⁵.

A calibração deve ser efetuada sempre que haja uma mudança no processamento, ou seja, das características físicas do material a ser analisado^{5,6}.

Esta é uma técnica rápida e não-destrutiva, indicada para o controle qualidade, quando um grande número de medidas ou quando medidas não-destrutivas em campo se fazem necessárias^{5,6,58,61,62,65}.

2.4 Processo de Manufatura de Anéis para Rolamentos

Como descrito no capítulo introdutório, o projeto SFB 570 se dedica à análise e ao estudo das principais causas da ocorrência de distorções durante o processo de manufatura de anéis para rolamentos, além de outros dois componentes. Como os anéis para rolamentos foram utilizados neste trabalho para comparar os resultados obtidos através da análise das tensões residuais através dos métodos do Furo Cego e Micromagnético, convém aqui, explicar as características e as propriedades do processo de manufatura de anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 seguido dentro do projeto SFB 570.

Dado que, o rolamento é o componente que permite que duas partes de um mecanismo se movam, relativamente livres uma da outra, em uma ou duas dimensões, sem que ocorra a deformação plástica de sua estrutura. A partir disto, pode-se constatar que um rolamento deve possuir um alto limite de elasticidade e uma boa dureza (54–63 Rockwell C), de modo que este não sofra deformação plástica, fratura frágil e possa operar com baixa fricção⁶⁸. O alto limite de escoamento dos aços ABNT 52100, após o tratamento térmico, resultante da microestrutura predominante martensítica com alto teor de carbeto primários faz com que estes aços sejam os mais indicados para a maioria das aplicações de um rolamento⁶⁸.

Basicamente, o processo de manufatura de anéis, de grande a médio porte, para rolamentos segue a seqüência disposta na Figura 2.22:



Figura 2.22: Representação geral do processo de manufatura de anéis para rolamentos⁶⁹.

Após o lingotamento, parte-se de um cilindro esferoidizado o qual é forjado, puncionado, cortado e laminado em temperaturas entre 1050 e 1150 °C (processo de conformação). Na condição de normalizados ou laminados a quente, os aços ABNT 52100 têm uma microestrutura essencialmente constituída de colônias de perlita lamelar podendo

apresentar um invólucro de cementita o que dificulta a usinagem, tornando necessária a realização de uma etapa de tratamento térmico de esferoidização. Normalmente, os anéis são esferoidizados em temperaturas entre 700 e 800 °C (por aproximadamente oito horas) e resfriados lentamente. Após o resfriamento, os anéis podem ser jateados, visando à remoção de carepa e melhoria das condições superficiais. Na etapa de usinagem da superfície externa do anel, este pode ser fixado, pela sua superfície interna por um sistema de sujeição que exerce pressão em três regiões distanciadas a 120 graus (Figura 2.23a), gerando desta forma deformações plásticas e tensões residuais não uniformes, como mostrado por Brinksmeier^{70,71} ou por um sistema homogêneo, onde a peça é fixada em toda a superfície (Figura 2.23b). A usinagem é efetuada em pequenos passes, a uma velocidade de rotação da peça de 240 m/min com avanços de corte variáveis.

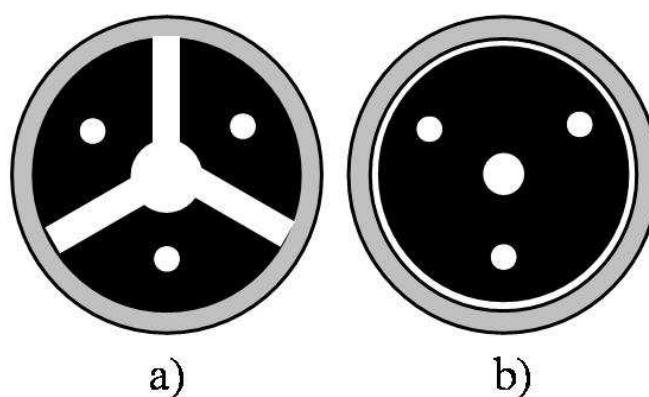


Figura 2.23: Representação dos sistemas de fixação interna de três pontos (a) e uniforme (b) do anel para o processo de usinagem⁷¹.

Após a usinagem, a peça parte para a etapa de tratamento térmico de endurecimento. O processo de têmpera se caracteriza pelo aquecimento do aço a 850° C, onde este é mantido por 25 minutos, seguido do resfriamento rápido em óleo. O resultado é uma microestrutura formada por uma matriz martensítica contendo carbeto primários com 5 a 10% de austenita retida. Após a têmpera, os anéis podem ser revenidos para o alívio das tensões originadas neste processo.

Para fins comparativos neste trabalho, uma amostra usinada foi recozida a 650 °C por duas horas, visando o completo alívio das tensões residuais originadas nas etapas anteriores do processo. É importante salientar que esta etapa não faz parte do processo de manufatura original destes componentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A Tabela 3.1 apresenta a composição química nominal dos aços ABNT 52100 em percentual de massa, onde a concentração de cromo e a alta concentração de carbono garantem a boa temperabilidade destes aços⁷².

Tabela 3.1: Composição química média dos aços ABNT 52100⁷³.

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,98 – 1,1	0,15 – 0,35	0,25 – 0,45	< 0,025	< 0,02	1,3 – 1,6

Durante o processo de manufatura de anéis para rolamentos do Aço ABNT 52100, parte-se de uma microestrutura esferoidizada, com boa usinabilidade (Figura 3.1a) com um limite de escoamento aproximado de 500 MPa e uma dureza superficial aproximada de 20 Rockwell C, para uma microestrutura martensítica (Figura 3.1b) com um limite de escoamento aproximado de 2033 MPa e uma dureza aproximada de 63 Rockwell C. Outras propriedades importantes destes aços são: Condutividade elétrica de $2,86 \times 10^6 \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$; Permeabilidade magnética relativa de 80 para o material no estado esferoidizado e 120 no estado temperado⁷³

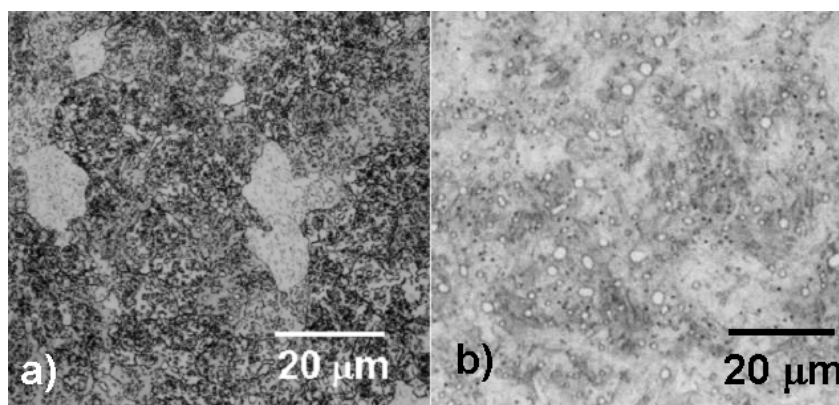


Figura 3.1: Microestruturas dos anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 nos estados conformados e usinados (a) e posteriormente temperado (b)⁷⁰.

3.2 Classificação das Amostras

As amostras extraídas das diferentes etapas do processo de manufatura de anéis para rolamento do aço ABNT 52100 foram classificadas de modo a representarem a etapa do processo a qual provêm. A partir disto, segue-se a seguinte nomenclatura:

Conformado: Para classificar o anel conformado a quente;

Usinado A: Para representar o anel usinado a frio com velocidade de rotação da peça de aproximadamente 240 m/min, velocidade de avanço da ferramenta de corte de 0,4 mm/min e uma profundidade de corte de 1 mm e um sistema de fixação interna de peça de três pontos (Figura 2.23a);

Usinado B: Para representar o anel usinado a frio com velocidade de rotação da peça de aproximadamente 240 m/min, velocidade de avanço da ferramenta de corte de 0,4 mm/min e uma profundidade de corte de 0,75 mm e um sistema de fixação interna uniforme da peça (Figura 2.23b);

Recozido: Para representar o anel usinado que foi submetido a um processo de recozimento para alívio de tensões;

Temperado: Para representar o anel endurecido, não revenido, proveniente da etapa final do processo de manufatura.

Todas as amostras foram marcadas pontualmente com uma ferramenta de impressão para designar a posição angular de 0° . A geometria das amostras segue a Figura 3.2, a seguir, onde D_{ext} é o diâmetro externo e D_{int} é o diâmetro interno do anel. Os diâmetros externo e interno foram de 150 mm e 130 mm, respectivamente, para o anel conformado utilizado. Para os demais anéis, estas dimensões foram de 145 e 133 mm. A largura de todos os anéis utilizados foi de 26 mm.

3.3 Métodos

3.3.1 Análise das Tensões Residuais através do Método do Furo Cego

As medidas para a análise das tensões residuais através do Método do Furo Cego foram realizadas com o equipamento MTS 3000 fabricado pela empresa Sint Technology. Foram utilizados extensômetros tipo roseta, fabricados pela empresa Vishay-Micro

Measurements, modelos EA-06-062RE-120 e CEA-06-062UL-120 (ambos com diâmetro médio de 5,13 mm). Os extensômetros foram ligados a um condicionador de sinais modelo Spider 8, fabricado pela empresa HBM.

Os extensômetros foram colados segundo a disposição mostrada na Figura 3.2, onde a direção do ERE 1 coincidiu com a direção tangencial do anel.

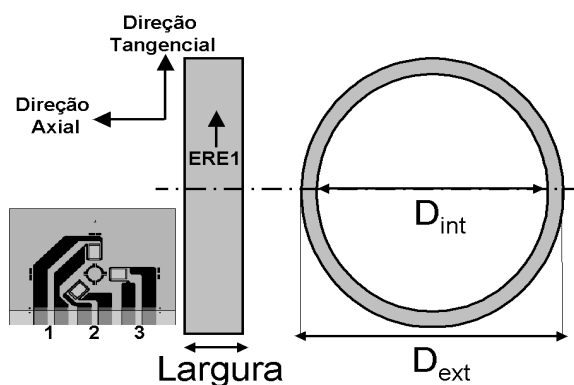


Figura 3.2: Visualização da disposição dos extensômetros colados nos anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 para a análise das tensões residuais através do Método do Furo Cego.

As medidas foram realizadas em 35 passes automáticos, com um tempo constante de 8 segundos entre passes adjacentes, distribuídos polinomialmente segundo a Equação 3.1, onde Z_n é a profundidade da medida, e N é o número do incremento correspondente.

$$Z_n = 8 \times 10^{-4} N + 2,86 \times 10^{-2} N^3 \times 10^{-4} \quad (3.1)$$

Foi utilizada uma pressão constante de 5 atm e uma velocidade de avanço da broca de 0,07 mm/min até uma profundidade de 2 mm.

A preparação das superfícies para a colagem dos extensômetros segue a norma ASTM E 837-01³⁶, onde as superfícies foram limpas com álcool e lixadas a seco com uma lixa abrasiva de grana 320.

As tensões residuais foram calculadas com o auxílio do programa EVAL-RS da HBM, através dos métodos da Integral, de Kockelmann e Séries de Potências.

A Figura 3.3 apresenta a disposição geral dos equipamentos e dos ensaios realizados.

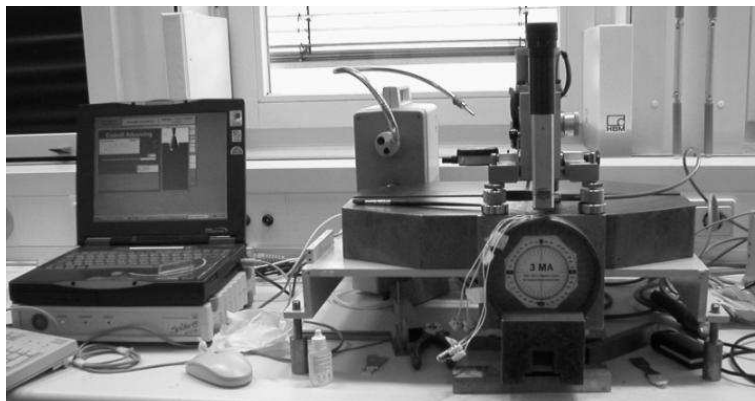


Figura 3.3: Disposição do equipamento para a análise das tensões residuais em anéis para rolamentos através do Método do Furo Cego.

3.3.2 Análise das Tensões Residuais através do Método Micromagnético

Primeiramente, um sensor micromagnético foi desenvolvido especialmente pelo IZFP (“Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren”, Alemanha) para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético em anéis para rolamentos. A Figura 3.4 apresenta a geometria deste componente, onde as regiões 1 e 2 correspondem ao núcleo da unidade de magnetização (6 mm de lado) e à bobina sensora (raio de 3 mm), respectivamente.

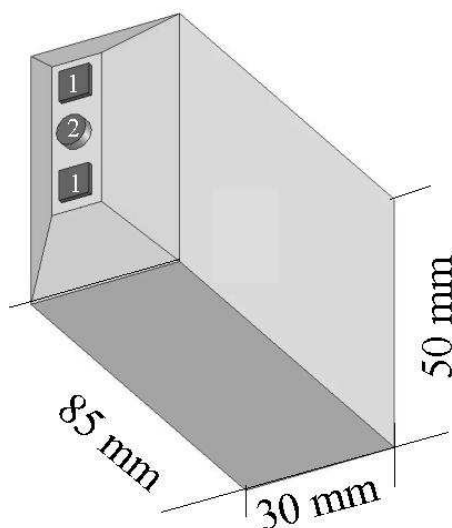


Figura 3.4: Geometria do sensor micromagnético desenvolvido para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético em anéis para rolamentos.

As características físicas deste sensor são consideradas segredos do fabricante e não puderam ser divulgadas neste trabalho.

As medidas micromagnéticas foram realizadas em um equipamento modelo Ferrotest Dur III fabricado pela empresa Tiede.

As medidas em baixa frequência foram realizadas nas seguintes condições:

- Magnitude do campo magnético aplicado: 100 A/cm;
- Amplificação do sinal acústico Barkhausen: 10 dB;
- Filtros de frequência de análise de 0,5, 2 e 50 KHz, sendo que para os filtros de 2 e 50 KHz foi utilizada uma frequência de oscilação do campo magnético de 100 Hz, e para o filtro de 0,5 foi utilizada uma frequência de 30 Hz.

Foram calculadas profundidades de pele de 1, 0,5 e 0,1 mm, correspondente às frequências de análise de 0,5, 2 e 50 kHz, respectivamente, para todos os anéis.

As medidas de alta frequência foram efetuadas nas seguintes condições:

- Magnitude do campo magnético aplicado: 100 A/cm;
- Frequência de oscilação do campo magnético de 100 Hz
- Atenuação do sinal micromagnético de -6 dB;
- Filtros de frequência de análise de 0,4 e 10 MHz, Sendo que para o filtro de 0,4 MHz foi utilizada uma amplificação de 10 dB e para o filtro de 10 MHz uma amplificação de 30 dB do sinal Micromagnético.

Foram calculadas profundidades de pele de 0,05 e 0,01 mm, correspondente às frequências de análise de 0,4 e 10 MHz, respectivamente, para todos os anéis.

A Figura 3.5 apresenta uma disposição dos equipamentos para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético.

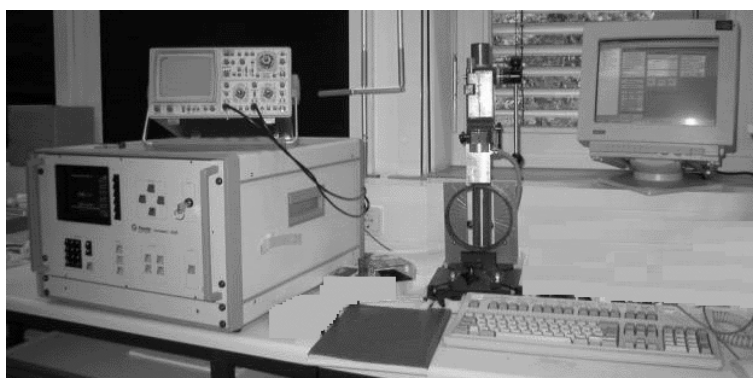


Figura 3.5: Disposição dos equipamentos para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético.

4 RESULTADOS

4.1 Disposição dos Resultados

Como o Método do Furo Cego é um dos métodos mais utilizados mundialmente e devido ao fato de que o Método Micromagnético dependeu dos resultados obtidos através do Método do Furo Cego para o procedimento de calibração, é natural apresentar primeiramente os resultados obtidos provenientes da análise das tensões residuais através do Método do Furo Cego seguido pela apresentação dos resultados obtidos através do Método Micromagnético.

A disposição dos resultados, por amostra, segue a seqüência estabelecida no processo de manufatura, ou seja: Primeiramente serão apresentados os resultados obtidos para o anel Conformado, seguido pelos anéis Usinado A, Usinado B, Recozido e Temperado.

4.2 Análise das Tensões Residuais Através do Método do Furo Cego

4.2.1 Observação: Erros de Medida

Durante a análise prática das tensões residuais através do Método do Furo Cego muitos problemas podem vir a ocorrer. Estes problemas se constituem em fontes potenciais de erros nas medidas de deformação e conseqüentemente no cálculo das tensões residuais determinadas através do Método do Furo Cego. Dentre estes, podemos citar: Problemas na usinagem de materiais de alta dureza ou de alta ductilidade, vibração da amostra ou do equipamento, quebra ou desgaste excessivo de fresa, plastificação da região do furo e variação da excentricidade do furo, entre outros. A totalidade do conjunto formado por estas características, inerentes ao ensaio, e a influência que estas causam nas deformações medidas são consideradas, neste trabalho, como Erros de Medida.

Deste modo, quando for dito que um ou outro método de cálculo, por exemplo, apresenta menor sensibilidade aos erros de medição, isto indica que este método apresentou baixa variação nas deformações medidas quando tais problemas ocorreram.

4.2.2 Deformações Medidas

Na Figura 4.1 temos a distribuição das deformações registradas em três direções (ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3), durante a usinagem de um furo de 2 mm de profundidade e, aproximadamente, 1,9 mm de diâmetro, situado na posição angular de 20° no anel Conformado. Percebe-se que as distribuições destas deformações apresentam baixa diferença segundo a direção de medida (ver Figura 3.2), sendo, este fato, indício da presença de tensões residuais uniformemente distribuídas, com a direção, numa dada profundidade do material. Outra importante informação, adquirida nesta figura, é que a presença de deformações predominantemente trativas, indica a presença de tensões residuais compressivas nesta região da amostra.

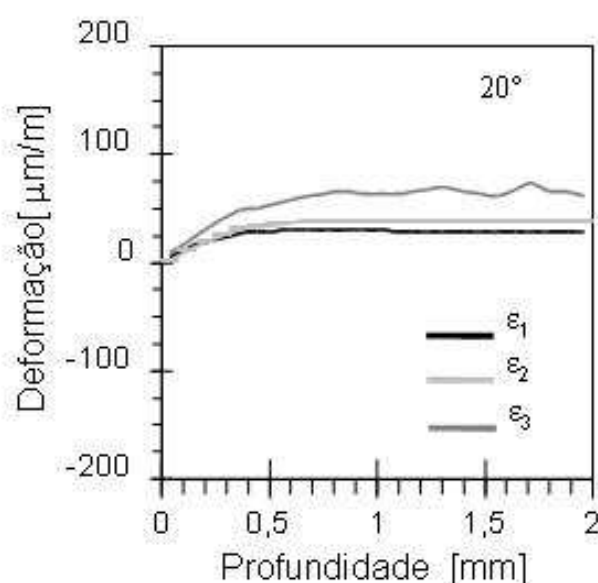


Figura 4.1: Variação das deformações medidas em três direções na posição angular de 20° para o anel Conformado.

Os demais resultados, das deformações medidas, obtidos em outras posições angulares deste anel e os resultados obtidos para os demais anéis estão dispostos no Anexo II.

4.3 Tensões Equivalentes

A Figura 4.2 apresenta a variação das tensões equivalentes de von Mises (calculadas a partir dos resultados obtidos através do Método da Integral) com a profundidade, calculadas para o anel Conformado, em três posições angulares diferentes.

Percebe-se que, para o furo realizado a 340° , na superfície e nas camadas adjacentes, as tensões equivalentes ultrapassam 50% do limite de escoamento do material, indicando que

pode ter ocorrido a plastificação localizada nestas regiões, devido ao processo de usinagem.

Esta plastificação pode ser origem de erros de medida nestas regiões, contudo segundo a literatura, estes erros são, em geral, inferiores a 20% dos valores reais.

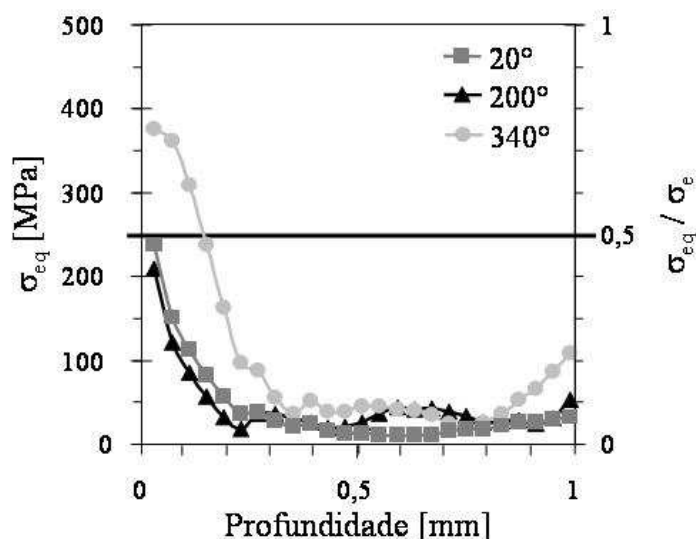


Figura 4.2: Distribuição das tensões residuais equivalentes de von Mises em três posições angulares diferentes do anel Conformado, calculadas a partir de dados calculados através do Método da Integral.

Para os demais furos, nota-se que as tensões residuais equivalentes de von Mises apresentam uma variação acentuada com a profundidade, sendo, porém, valores inferiores à metade do limite de escoamento médio do material.

As distribuições das tensões residuais equivalentes de von Mises podem ser calculadas a partir do critério de von Mises⁷⁴ (Equação 4.1) para os demais anéis.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2 + (\sigma_{\min})^2 + (\sigma_{\max})^2]} \quad (4.1)$$

Onde σ_{eq} , representa a tensão residual equivalente de von Mises, e σ_{\max} e σ_{\min} , são as tensões residuais principais.

4.3.1 Ângulos Principais

Como descrito anteriormente, os ângulos principais são os ângulos, no sentido anti-horário, que descrevem a direção da tensão residual principal máxima, a partir do extensômetro número 1, para um dado incremento.

A Figura 4.3 apresenta a variação dos ângulos principais para os anéis Conformado, Usinado A, Recozido e Temperado, analisados neste trabalho.

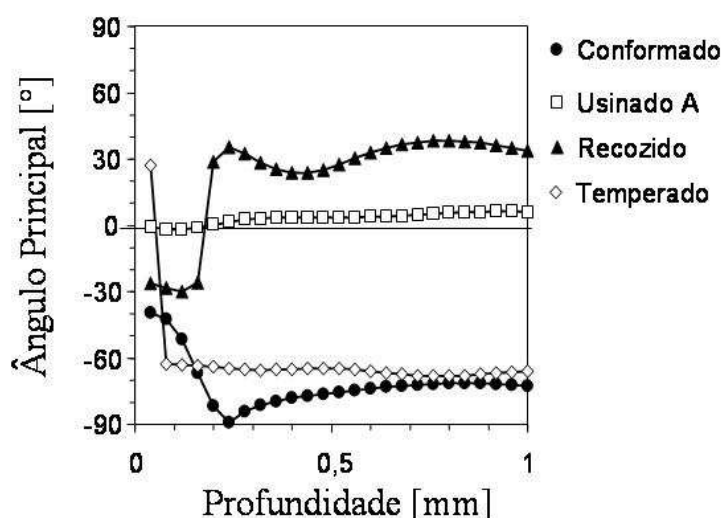


Figura 4.3: Variação das Ângulos principais com a profundidade para os anéis para rolamentos do aço ABNT 52100, provenientes de diferentes etapas do processo de manufatura deste componente.

Percebe-se que, devido à direção de avanço adotado no processo de usinagem (aproximadamente $\pm 2^\circ$ da direção tangencial) a direção principal coincide, praticamente, com a direção tangencial (ver Figura 3.2). Para os demais anéis, a variação da direção principal apresenta maior dependência com as características do material, do que com as características do processo, propriamente dito.

A partir destes ângulos principais e, com base no critério estabelecido pelo círculo de Mohr de tensões biaxiais⁷⁴ (Equações 4.2 e 4.3), as tensões residuais principais obtidas neste trabalho, através do Método do Furo Cego, foram decompostas nas componentes de direção tangencial e axial.

$$\sigma_{\tan} = \left(\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right) + \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cos(2\beta) \quad (4.2)$$

$$\sigma_{\text{axial}} = \left(\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \right) + \frac{1}{2} (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cos[2(\beta + 90^\circ)] \quad (4.3)$$

Onde σ_{\tan} e σ_{axial} são as tensões residuais na direção tangencial e axial, respectivamente.

4.3.2 Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Conformado

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os resultados da análise dos perfis de tensões residuais no anel Conformado, nas posições angulares de 20° , 200° e 340° , calculados através dos métodos da Integral, de Kockelmann e das Séries de Potências. As figuras correspondem aos resultados obtidos nas direções axial e tangencial, respectivamente.

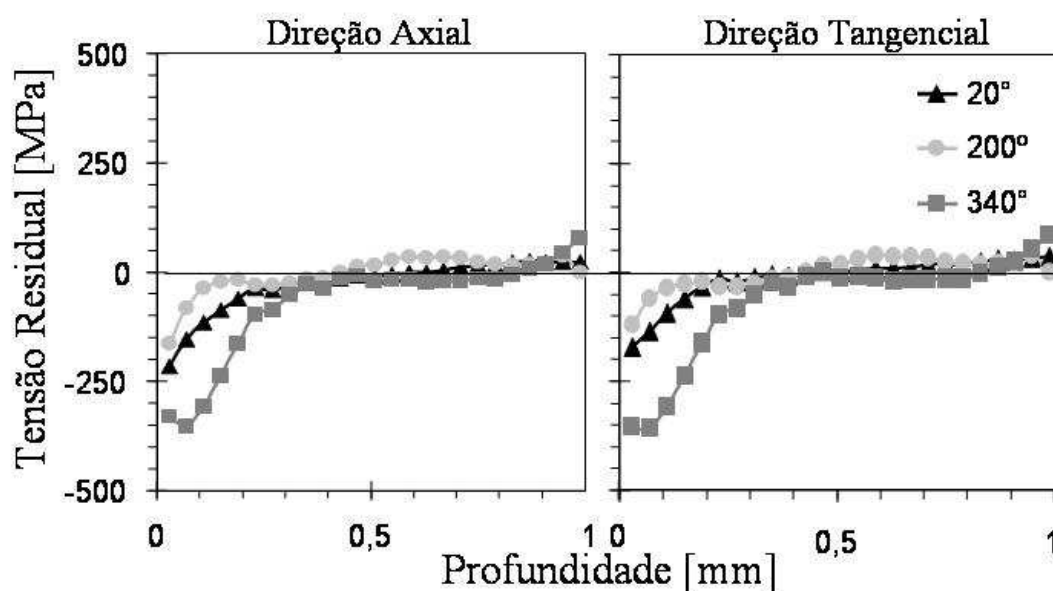


Figura 4.4: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Conformado.

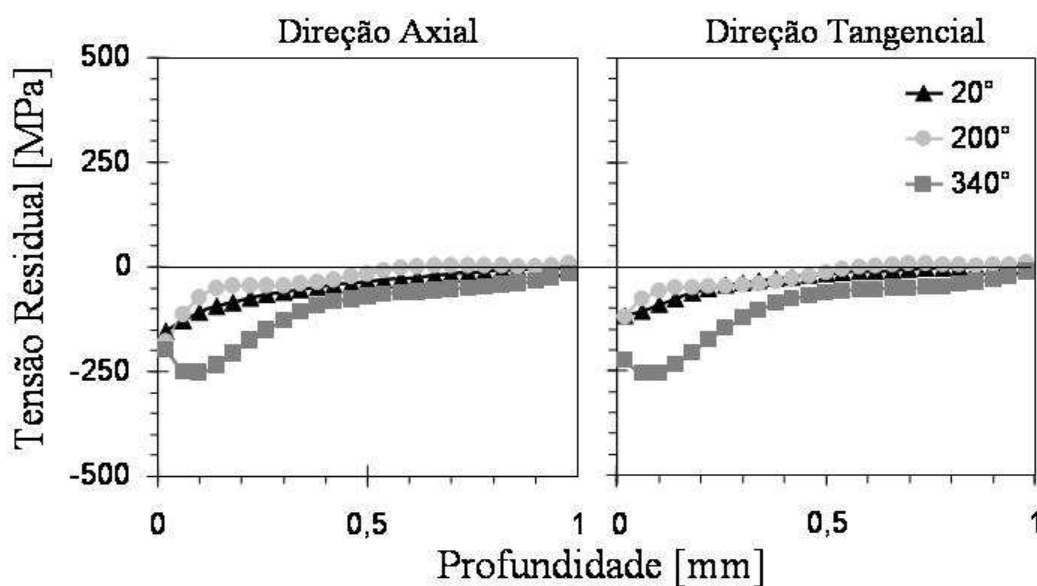


Figura 4.5: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Conformado.

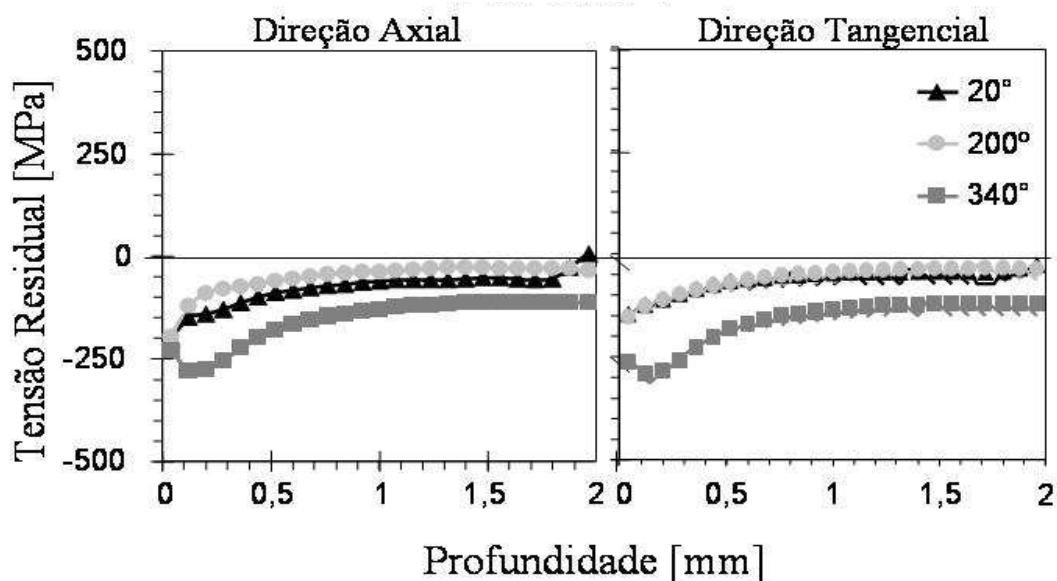


Figura 4.6: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Conformado.

Os resultados representam distribuições de tensões residuais típicas de materiais conformados a quente, apresentando tensões residuais compressivas de baixa magnitude nas camadas superficiais, as quais tendem a se anular em maiores profundidades. Percebe-se que o Método da Integral, Figura 4.4, apresentou os resultados bem representativos, indicando pouca variação na distribuição devido à erros de medição, valores maiores para a máxima tensão residual compressiva e a ocorrência da inversão para valores trativos em maiores profundidades. Isto pode ser explicado devido à boa usinabilidade do material, em relação às demais amostras tratadas neste trabalho, o que facilitou a usinagem dos furos e a realização dos ensaios propriamente ditos.

4.3.3 Determinação das Tensões Residuais Presentes nos Anéis Usinados

A Figura 4.7, a seguir, apresenta as distribuições de tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas para três furos, posicionados à 0° , 60° e 160° , nas direções axial e tangencial do Anel Usinado A.

A presença de tensões residuais trativas nas camadas subsuperficiais na direção tangencial só foi detectada no furo realizado a 160° . Esta diferença, em relação às demais posições, pode ser explicada pela ocorrência de plastificação das camadas subsuperficiais durante a usinagem do furo. Esta plastificação acarretou na introdução de tensões residuais compressivas nesta região, as quais se superpuseram às tensões residuais trativas pré-

existentes. De qualquer forma, esta influência se distribui, apenas, até profundidades de 0,2 mm, em geral, não comprometendo os resultados obtidos neste ensaio.

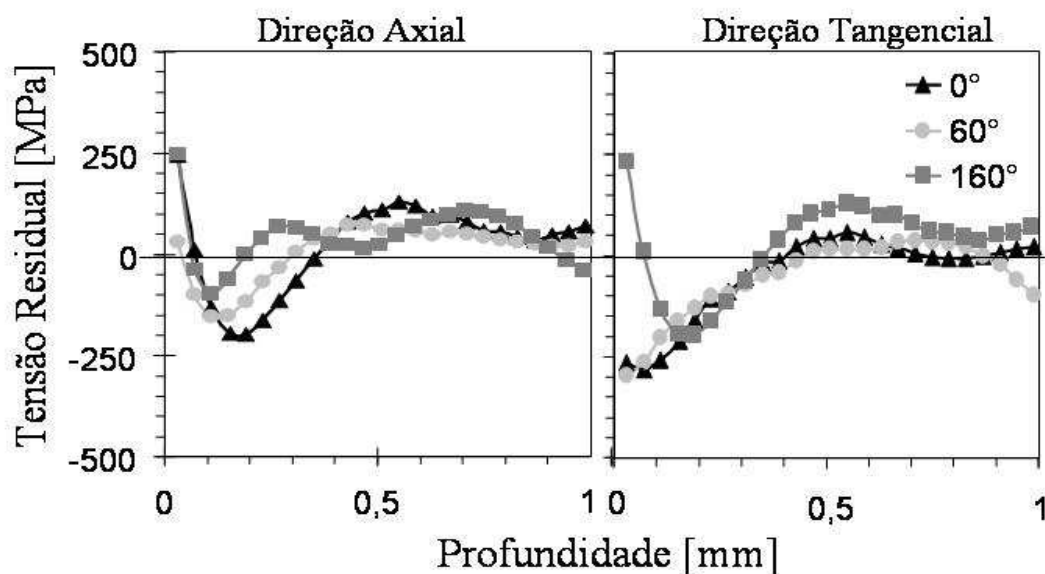


Figura 4.7: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado A.

A Figura 4.8 apresenta as distribuições de tensões residuais, presentes no anel Usinado A, calculadas através do Método de Kockelmann.

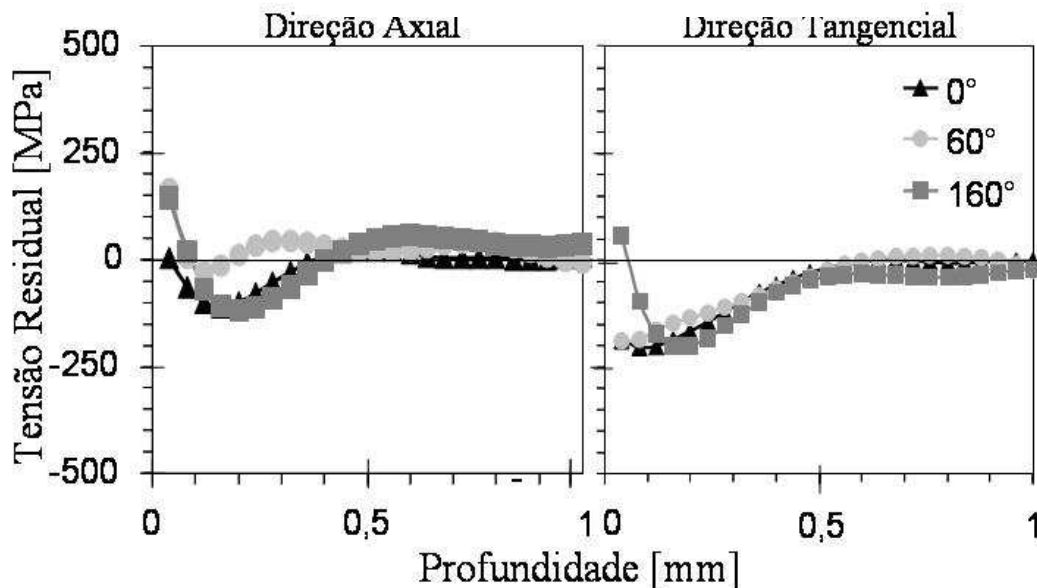


Figura 4.8: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado A.

O Método de Kockelmann, Figura 4.8, forneceu valores inferiores para as tensões residuais distribuídas nas camadas subsuperficiais e curvas mais uniformes no restante da distribuição, isto é devido, principalmente à redução da sensibilidade aos erros de medida das deformações alcançada com a utilização deste método.

Na Figura 4.9 estão apresentados os resultados obtidos através do Método das Séries de Potências, para os mesmos furos descritos anteriormente. Onde se percebe, que as distribuições das tensões residuais obtidas são mais suaves, porém, menos representativas, do que as distribuições apresentadas nos resultados anteriores. Isto é devido à baixa sensibilidade deste método para a determinação de campos de tensões residuais que apresentam grande variação com a profundidade.

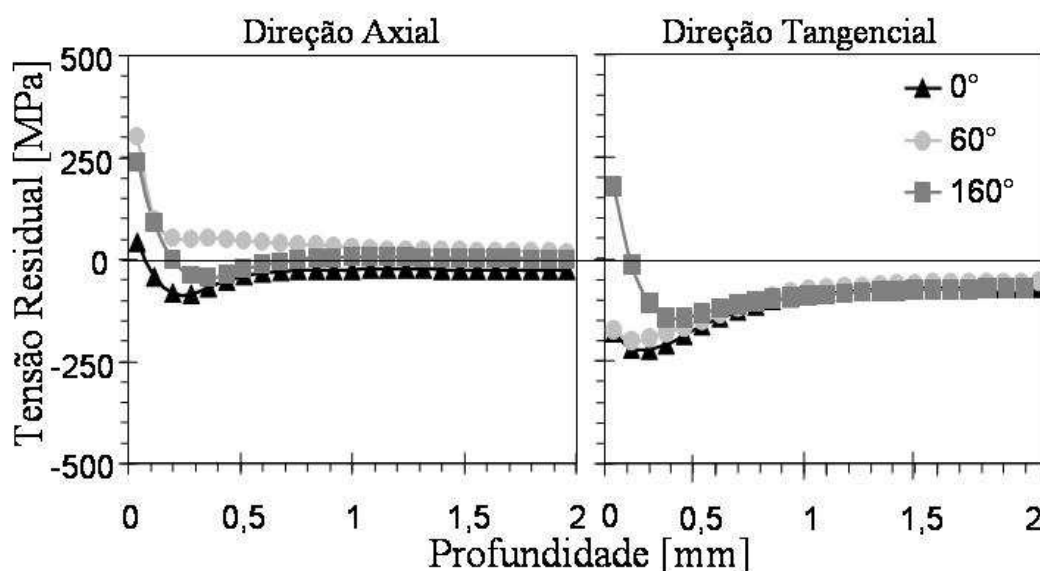


Figura 4.9: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado A.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam as distribuições de tensões residuais calculadas através dos métodos da Integral, de Kockelmann e das Séries de Potências, respectivamente, obtidas para três furos, posicionados a 90°, 120° e 150°, nas direções axial e tangencial, para o anel Usinado B.

Neste caso, fica mais evidente a melhoria dos resultados alcançada com a utilização do Método de Kockelmann para o cálculo das tensões residuais nestes componentes. Isto pode ser visualizado, assumindo-se a homogeneidade da amostra, comparando-se a forma da curvas referentes aos furos realizados na posição angular de 90°. Ocorre que, analisando-se a influência do processo de usinagem nas distribuições de tensões residuais presentes nestes

componentes, percebe-se que é pouco provável a ocorrência do tipo de variação apresentado na Figura 4.10 em profundidades superiores a 0,5 mm.

Nas Figuras 4.10 e 4.11, pode-se notar a diferença nos valores da máxima tensão residual compressiva em função da posição angular, na direção axial, o que não é percebido na Figura 4.12.

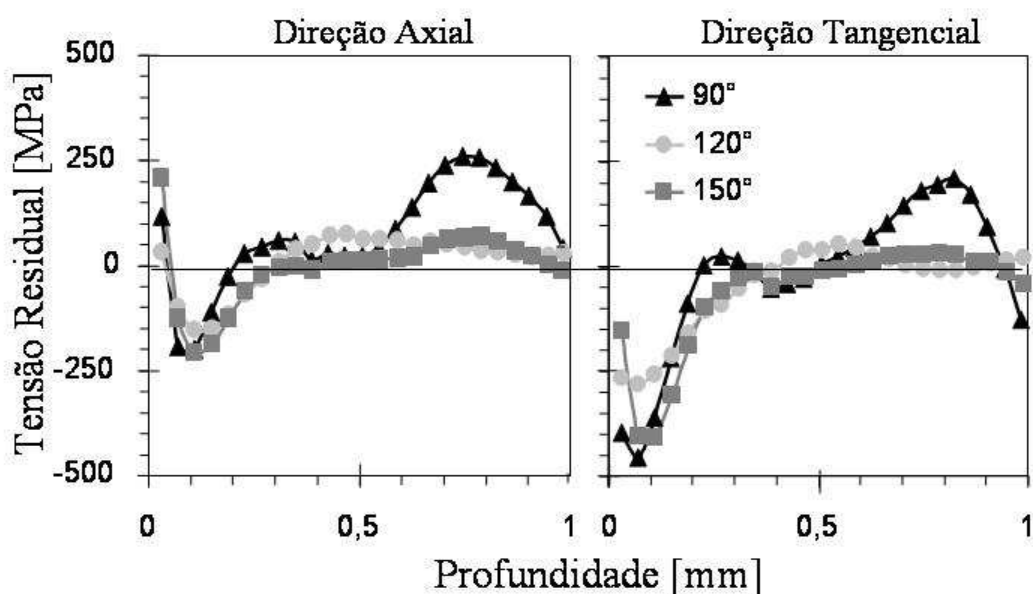


Figura 4.10: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado B.

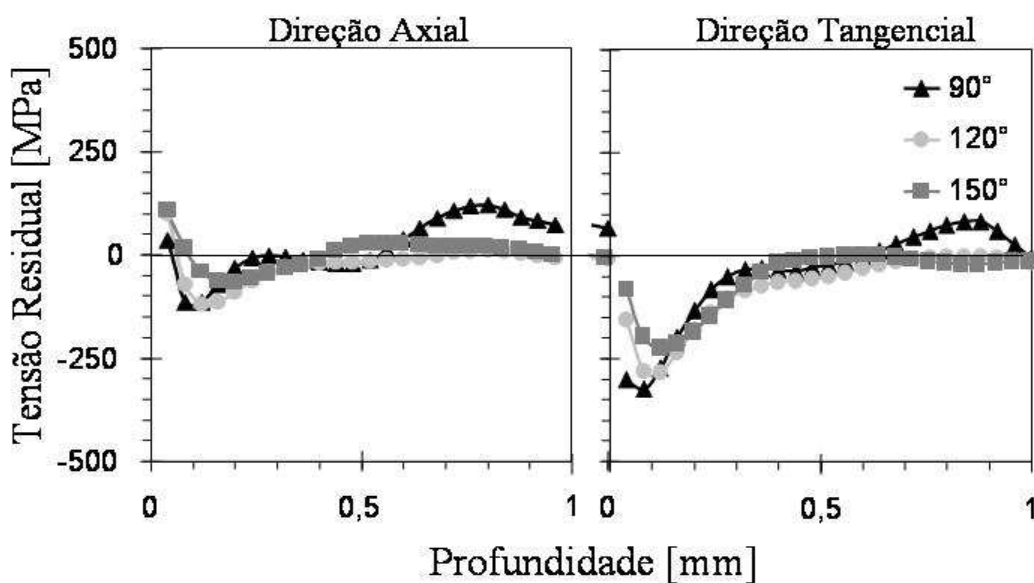


Figura 4.11: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado B.

O Método das Séries de Potências, Figura 4.12, também fornece uma boa aproximação qualitativa da distribuição de tensões residuais presente neste componente, mas não diferencia as distribuições de tensões residuais encontradas em diferentes posições angulares, como foi apresentado nos resultados anteriores.

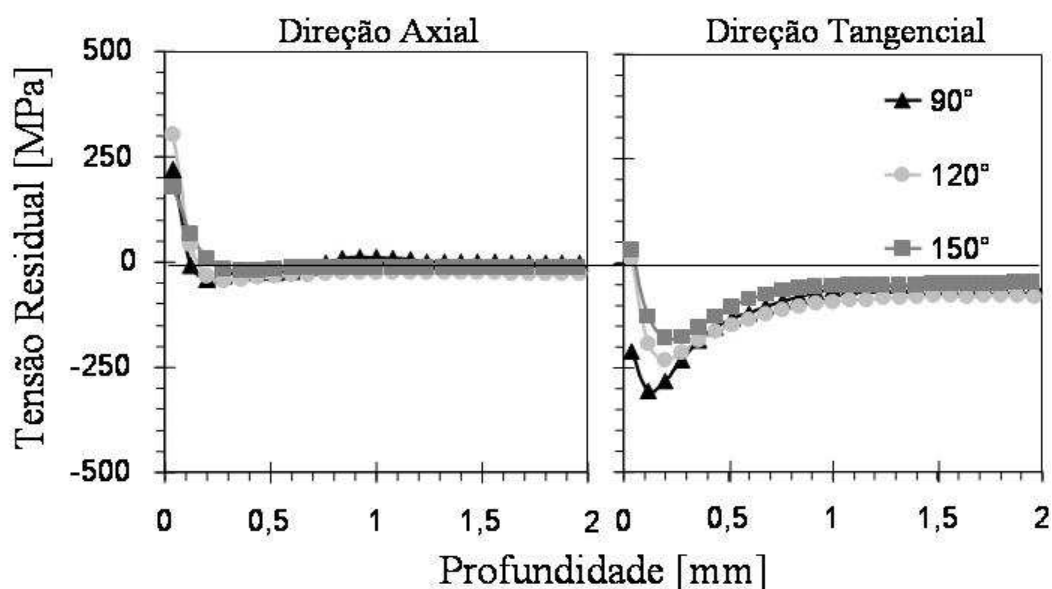


Figura 4.12: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Usinado B.

4.3.4 Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Recozido

Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15, a seguir, estão representados os resultados obtidos para a análise das tensões residuais distribuídas no anel Recozido, nas posições angulares de 0° , 30° e 60° , calculados através dos métodos da Integral, de Kockelmann e das Séries de Potências.

A partir da análise destes resultados, percebe-se que o Método das Séries de Potências, Figura 4.15, apresentou resultados de maior representatividade, sendo estes distribuídos em uma profundidade de até 2 mm abaixo da superfície. Isto é devido, principalmente aos princípios deste método, o qual é indicado para a determinação de perfis de tensões residuais que apresentam baixa variação com a profundidade, como o perfil presente em um material recozido, por exemplo.

As variações na distribuição das tensões residuais no furo realizado na posição angular de 30° , Figura 4.13, podem ser atribuídos a erros de medida devido à problemas durante o ensaio.

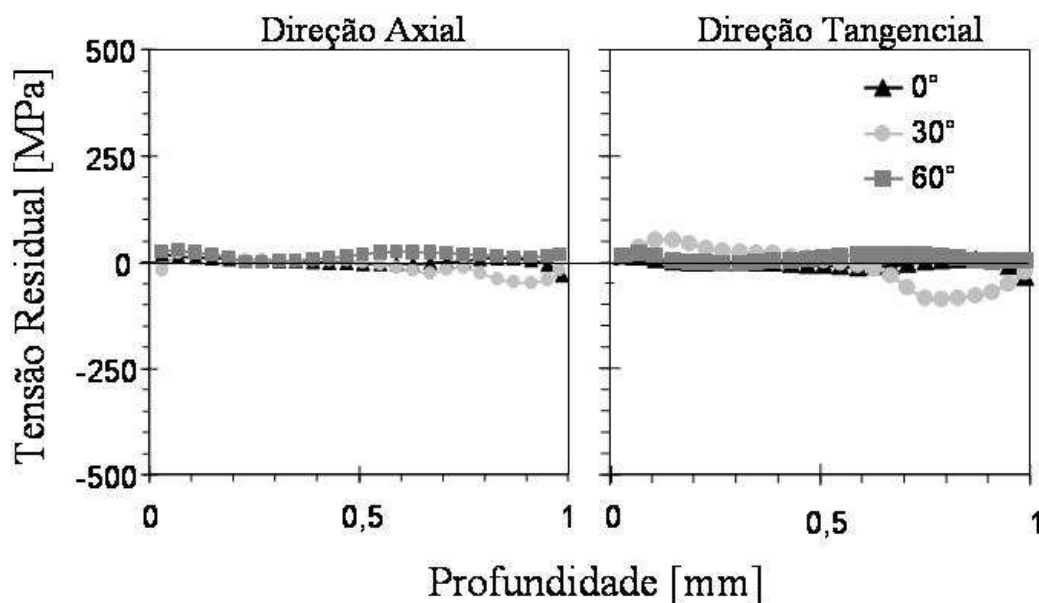


Figura 4.13: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Recozido.

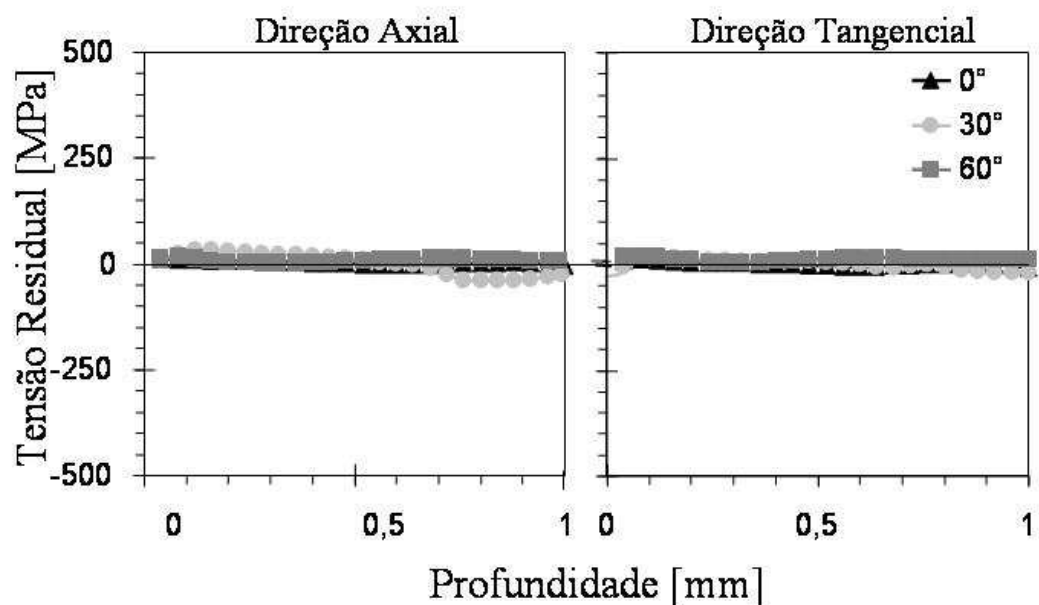


Figura 4.14: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Recozido.

Nota-se, também, que o Método da Integral apresenta uma distribuição um pouco menos homogênea do que o Método de Kockelmann, contudo ambos os métodos apresentam resultados representativos distribuídos até uma profundidade, neste caso, de apenas 1 mm, enquanto que os resultados apresentados pelo Método das Séries de Potências se distribuem até uma profundidade de 2 mm.

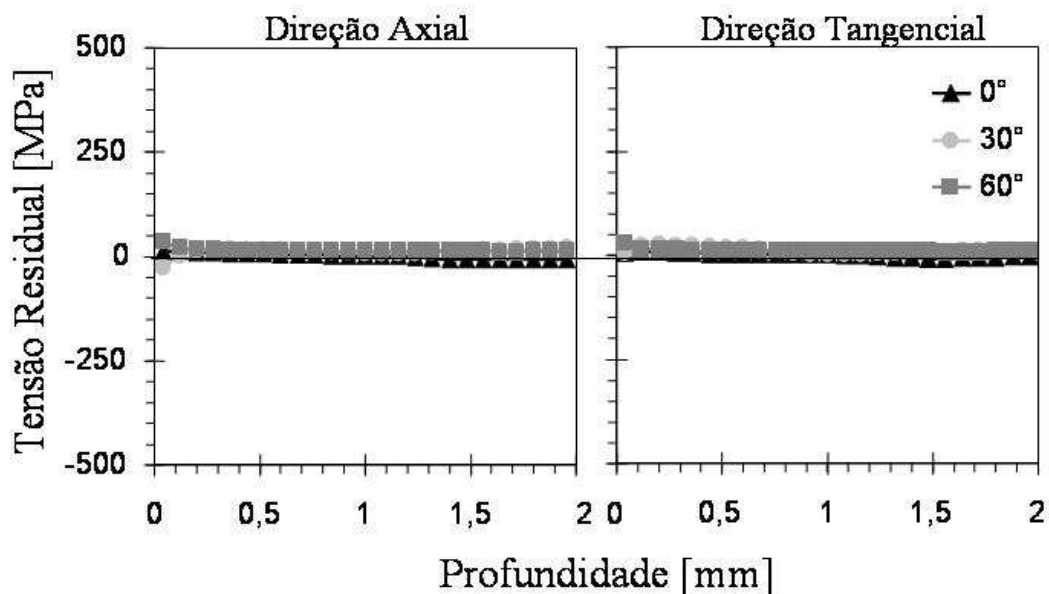


Figura 4.15: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Recozido.

4.3.5 Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Temperado

Nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 estão representados os resultados das análises das tensões residuais distribuídas no anel Temperado, calculados através dos métodos da Integral, de Kockelmann e das Séries de Potências.

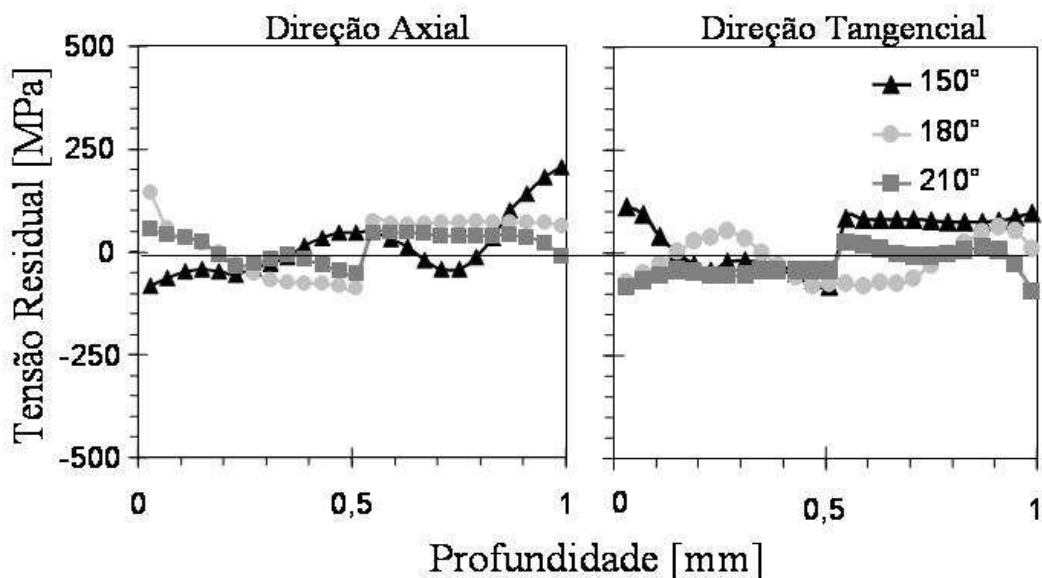


Figura 4.16: Variação das tensões residuais calculadas através do Método da Integral, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Temperado.

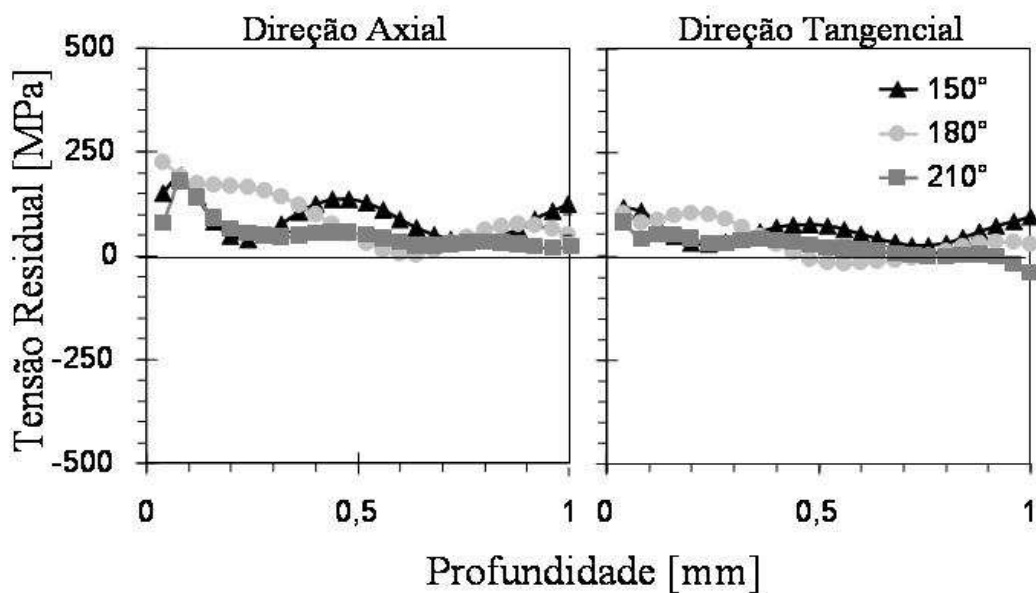


Figura 4.17: Variação das tensões residuais calculadas através do Método de Kockelmann, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Temperado.

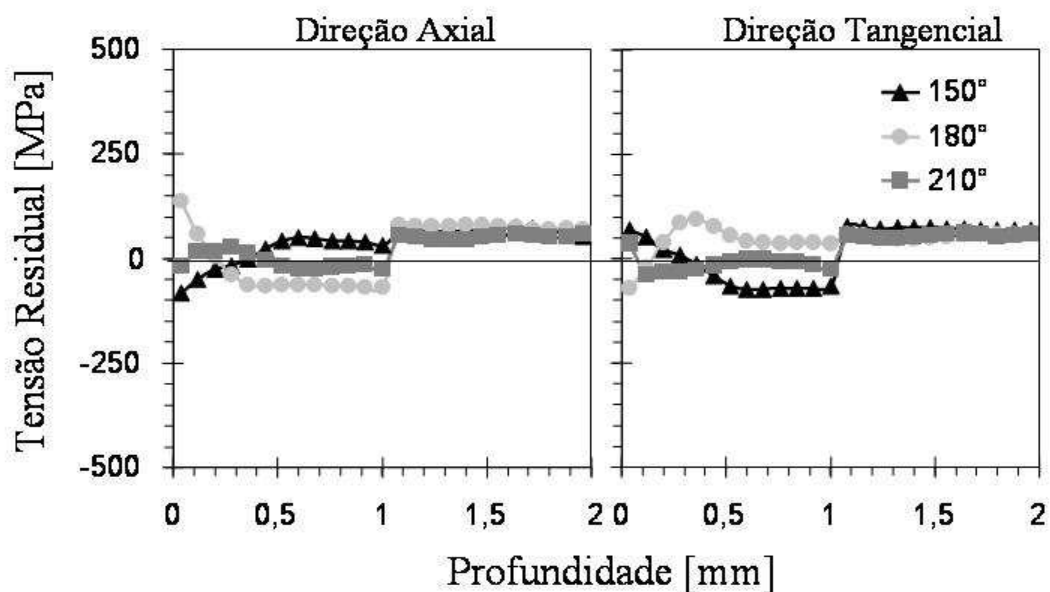


Figura 4.18: Variação das tensões residuais calculadas através do Método das Séries de Potências, obtidas através do Método do Furo Cego para o Anel Temperado Método.

Neste caso, o processo de usinagem apresentou dificuldades superiores aos anteriores, pois a alta dureza do material reduz consideravelmente a efetividade da turbina de alta velocidade na usinagem do furo. Em alguns casos, foi preciso a parada do equipamento durante o processo de usinagem, devido ao desgaste excessivo de fresa. Isto acarretou em

erros nas medidas de deformações como pode ser percebido na grande variação das distribuições apresentadas na Figura 4.16.

Contudo o Método de Kockelmann apresentou valores de grande representatividade, dentro da escala esperada para materiais endurecidos, apresentando distribuições de tensões residuais trativas de baixa magnitude, tendendo a compressivas em maiores profundidades.

Os métodos da Integral e das Séries de Potências apresentaram resultados menos significativos, sendo estes mais influenciados pelos erros de medição, em geral, do que o Método de Kockelmann.

Observação:

De maneira geral, pode ser dito que as distribuições de tensões residuais obtidas através do Método do Furo Cego se apresentam dentro da escala esperada para cada amostra.

Devido ao fato de os anéis serem sujeitos a um processo de deformação excessiva durante o processo de conformação, esta deformação acentuada é a principal responsável pela distribuição de tensões residuais presente no anel Conformado, onde a presença da máxima tensão residual compressiva se encontra abaixo da superfície devido aos processos de recuperação elástica do material, que ocorrem nesta região.

Devidos as deformações causadas e ao aquecimento superficial do componente durante o processo de usinagem, é esperado a presença de tensões residuais de alta magnitude variando de trativas a compressivas nas camadas sub-superficiais, para os anéis Usinados.

Para o anel Recozido, é esperada uma distribuição de tensões residuais aproximadamente nula devido ao alívio das tensões resultante deste processo.

Para o anel Temperado, a presença de tensões residuais trativas, até a profundidade medida, é oriunda da deformação no retículo cristalino associada, em geral, à transformação martensítica. Contudo, devido à geometria do componente e da homogeneidade desta transformação, estas tensões residuais apresentam baixa magnitude quando comparadas ao limite de escoamento do material no estado endurecido.

4.4 Análise das Tensões Residuais Através do Método Micromagnético

4.4.1 Análise dos Sinais Micromagnéticos

Primeiramente, é de grande importância entender como variam, qualitativamente, as propriedades micromagnéticas em função da posição angular da medida. Isto pode ser observado nas Figuras 4.19 e 4.20, onde estão representadas as variações de M_{\max} e H_{cm} , em função da posição angular, para todos os anéis, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz (referente à profundidade de pele de 0,01mm).

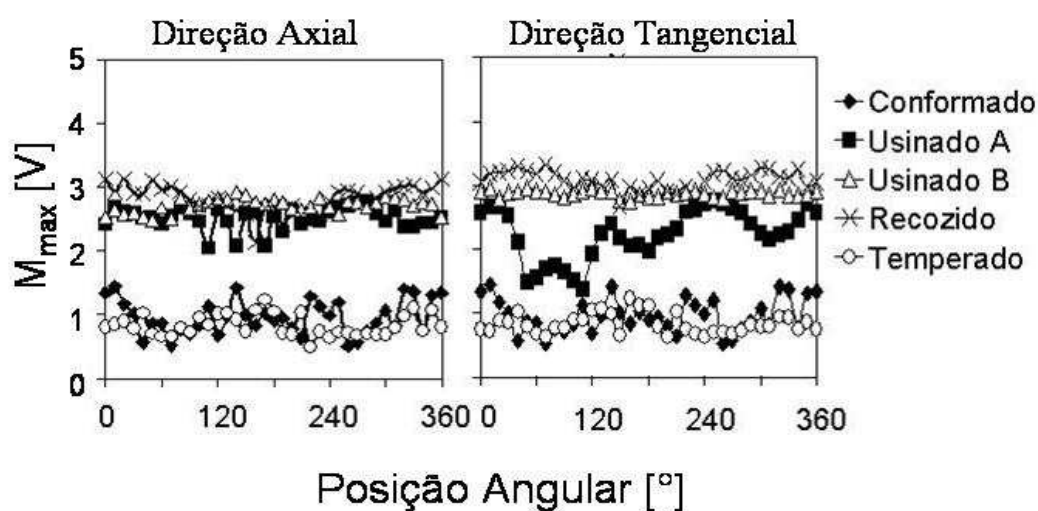


Figura 4.19: Representação da variação de M_{\max} com a posição angular, para todos os anéis, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz.

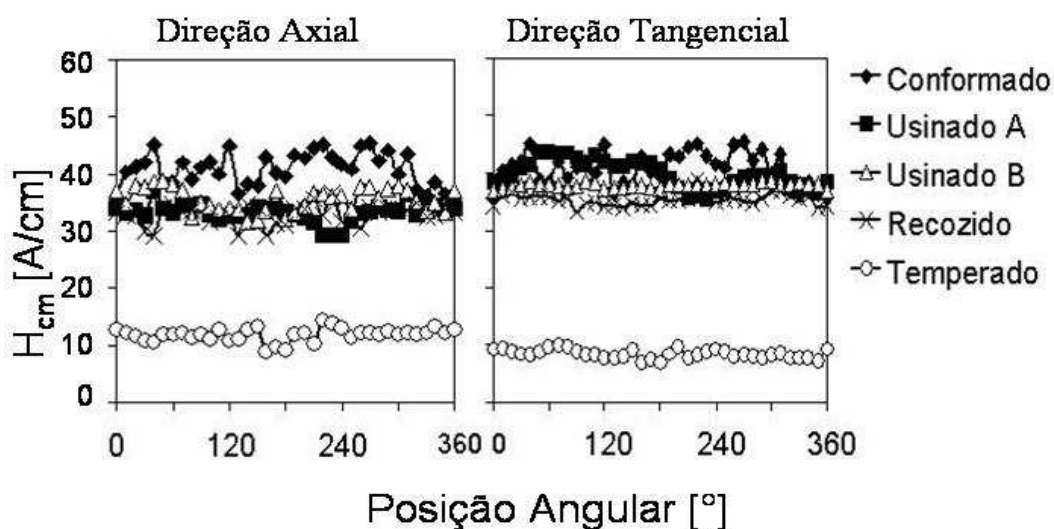


Figura 4.20: Representação da variação de H_{cm} com a posição angular, para todos os anéis, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz.

Percebe-se que, nesta frequência de análise, o sinal M_{\max} (ver Figura 4.19) apresenta uma variação mais significativa para o anel Usinado A, na direção tangencial. Fato este, que não ocorre para o anel Usinado B na mesma direção. Para os demais anéis, M_{\max} apresenta variações aleatórias de baixa magnitude, nesta frequência de análise, com a posição angular. Isto está associado à maior ou menor facilidade do movimento das paredes dos domínios magnéticos do material, sob a ação do campo magnético externo oscilante de 100 A/cm.

Quanto ao sinal H_{cm} (ver Figura 4.20), pode-se dizer que, com exceção do anel temperado, este apresenta valores muito próximos para todos os anéis, nesta frequência de análise. Isto pode ser atribuída a semelhança entre a condição microestrutural para estes anéis, diferente da microestrutura apresentada pelo anel temperado, na profundidade correspondente a esta frequência de análise.

Quantitativamente, não faz sentido comparar os resultados obtidos através deste método, para as diferentes amostras, antes do processo de calibração, pois a distribuição de tensões residuais influencia na configuração e na distribuição dos domínios magnéticos, tanto quanto na intensidade dos sinais micromagnéticos medidos.

Os demais resultados para a análise da variação dos parâmetros micromagnéticos em função da posição angular para os filtros de frequência de análise de 0,4 MHz, 50 kHz, 2 kHz e 0,5 kHz estão dispostos no Anexo III.

4.4.2 Processo de Calibração

O procedimento de calibração do Método Micromagnético foi realizado com auxílio de um programa de regressão linear, a partir de dados provenientes da análise de tensões residuais através dos métodos de Difração de raios X (para os anéis usinados, nas camadas superficiais) e do Furo Cego, utilizando dados provenientes de quatro posições angulares diferentes para cada amostra. Como resultado foram obtidas equações de calibração da forma da Equação 4.4, onde as constantes x_1 , x_2 , x_3 estão apresentadas no Anexo IV.

$$\sigma_{\text{MM}} = x_1 M_{\max} + x_2 H_{\text{cm}} + x_3 \quad (4.4)$$

A partir da distribuição de sinais micromagnéticos e das equações de calibração (Equação 4.4 utilizando os coeficientes da Tabela disposta no Anexo IV) podemos determinar as distribuições de tensões residuais, para cada filtro de análise, presentes nos anéis para rolamentos do aço ABNT 52100. A Figura 4.21 apresenta, como exemplo, a distribuição de

tensões residuais determinada através do Método Micromagnético, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz (correspondente à profundidade de pele de 0,01mm), para todos os anéis.

Percebe-se que esta variação é semelhante a variação apresentada pelo sinal M_{max} , sendo mais significativa para o anel Usinado A, do que para os demais. Isto pode ser justificado, analisando a natureza da distribuição de tensões residuais presente no anel Usinado A. Onde a variação, semelhante a uma distribuição senoidal, das tensões residuais foi explicada por Brinksmeier¹⁸ como sendo causada pelo processo de fixação da peça (Figura 2.23), durante o processo de usinagem.

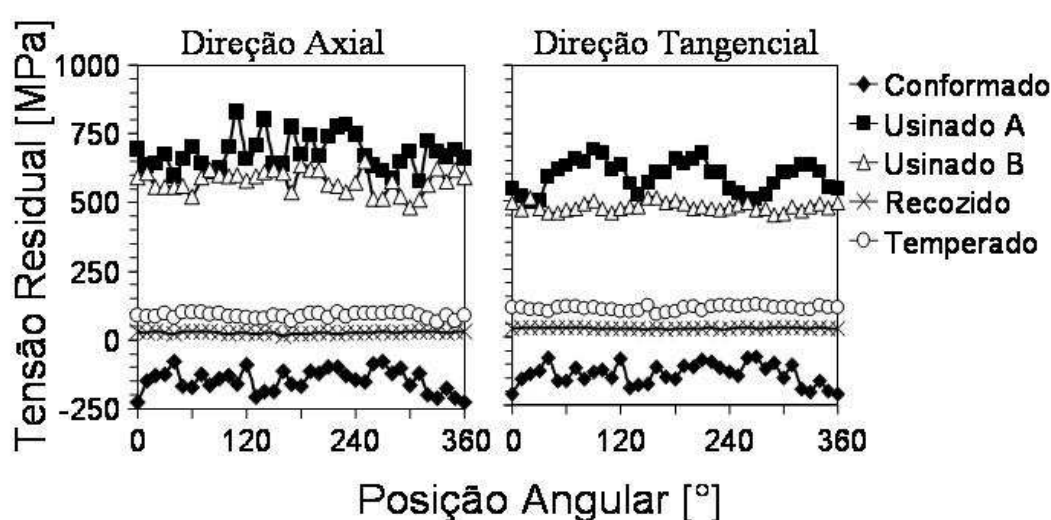


Figura 4.21: Representação da variação das tensões residuais com a posição angular, para todos os anéis, utilizando-se um filtro de frequência de análise de 10 MHz.

Resultados semelhantes, para os filtros de frequência de análise de 0,4 MHz, 50 kHz, 2 kHz e 0,5 kHz estão apresentados no Anexo V.O interessante nestes resultados, é notar como variam as distribuições de tensões residuais, para cada amostra, para cada profundidade analisada.

Os resultados apresentados, a seguir, representam as distribuições médias das tensões residuais (média dos 35 pontos, ao longo da circunferência) em função da profundidade, nas direções axial e tangencial. A barra transversal corresponde ao desvio padrão apresentado para cada distribuição.

A seqüência de apresentação dos resultados, por amostra, segue a mesma seqüência utilizada na apresentação dos resultados obtidos através do Método do Furo Cego.

4.4.3 Determinação das Tensões Residuais Presentes no Anel Conformado

A Figura 4.22 apresenta os resultados, para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético, obtidos para o anel Conformado, em cinco profundidades, nas direções axial e tangencial.

Neste caso, para ambas as direções, percebe-se a não uniformidade da distribuição em função da posição angular, caracterizando um material que sofreu um processo irregular de deformação nas camadas superficiais e sub-superficiais. Isto pode ser visualizado através da distribuição de tensões residuais compressivas e do desvio padrão considerável desta distribuição, principalmente nas camadas sub-superficiais (até 0,1 mm de profundidade).

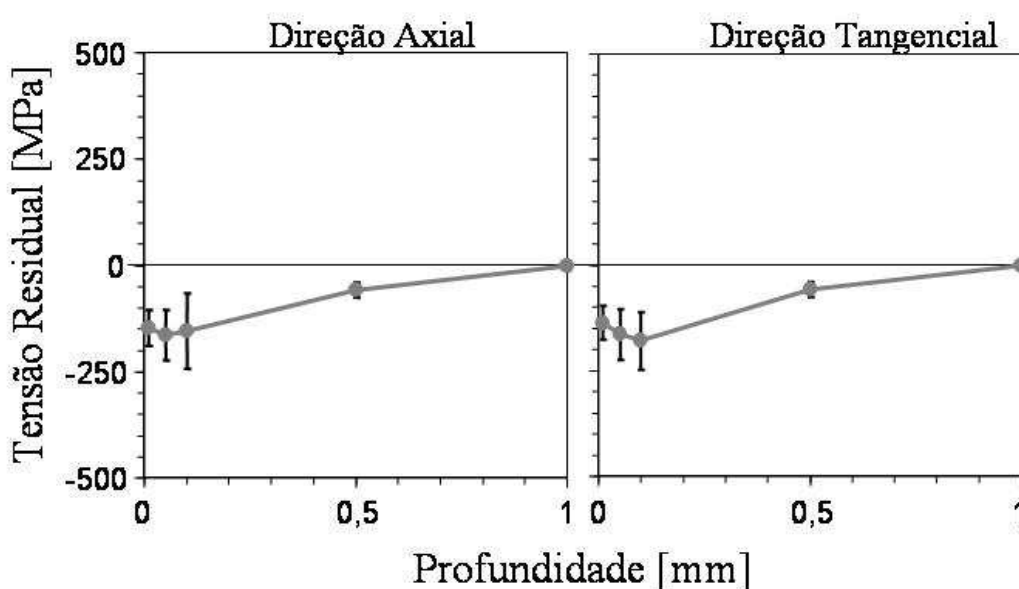


Figura 4.22: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Conformado, obtidas através do Método Micromagnético.

4.4.4 Determinação das Tensões Residuais Presentes nos Anéis Usinados

A Figura 4.23, a seguir, apresenta os resultados, para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético, obtidos para o anel Usinado A, em cinco profundidades, nas direções axial e tangencial.

Percebe-se que as tensões residuais apresentam grande variação em função da posição angular na camada superficial, apresentando um desvio padrão de quase 10% nesta distribuição, principalmente na direção axial, a qual apresenta os valores de tensões residuais mais trativos nas camadas superficiais.

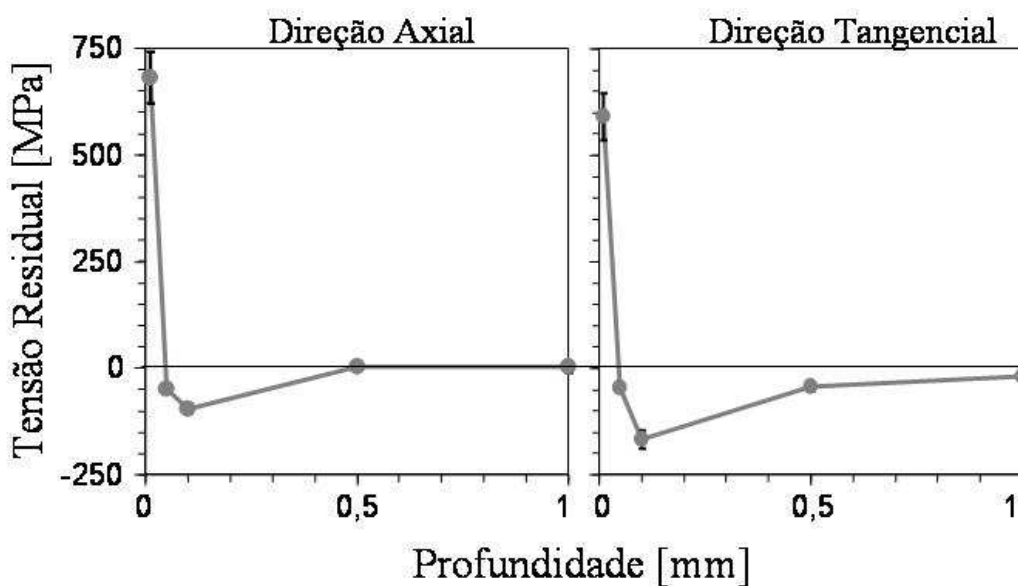


Figura 4.23: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Usinado A, obtidas através do Método Micromagnético.

É importante notar que a variação considerável da distribuição de tensões residuais ocorre apenas nas camadas superficiais, sendo o desvio padrão pouco significativo para as demais profundidades.

A Figura 4.24 apresenta os resultados, para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético, obtidos para o anel Usinado B, em cinco profundidades, nas direções axial e tangencial.

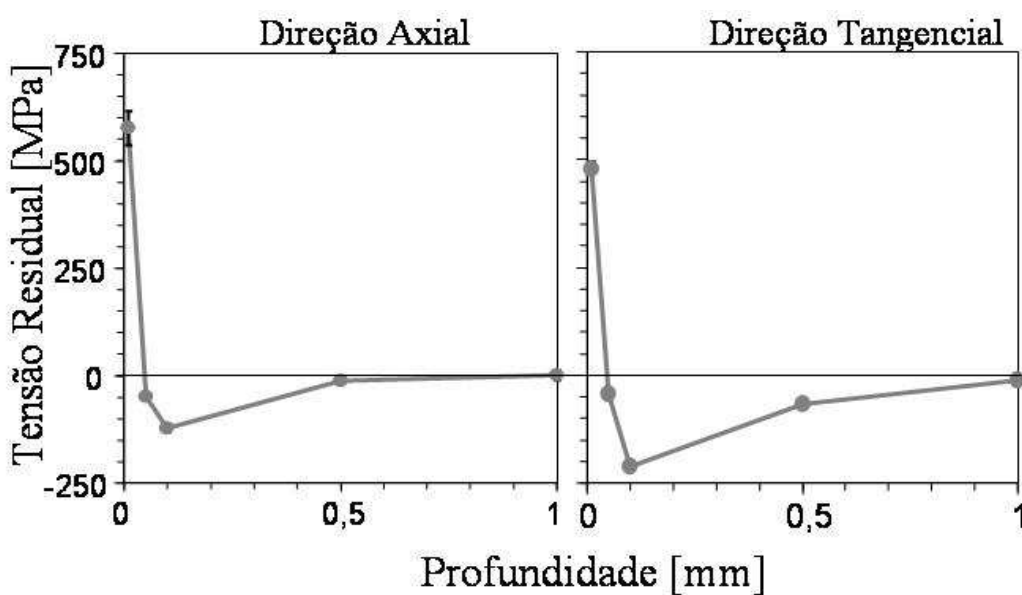


Figura 4.24: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Usinado B, obtidas através do Método Micromagnético.

Neste caso, percebe-se que a média e o desvio padrão apresentados pelas distribuições de tensões residuais nas camadas superficiais são inferiores aos valores apresentados para o anel Usinado A. Isto pode ser atribuído à influência do processo de fixação da peça durante o processo de usinagem, na origem e na variação da distribuição de tensões residuais nos componentes.

Como no caso anterior, a máxima tensão residual compressiva está localizada na profundidade de 0,1 mm, onde a variação é desprezível, mostrando que a influência do processo de fixação ocorre apenas nas camadas mais superficiais.

A Figura 4.25 apresenta os resultados, para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético, obtidos para o anel Recozido, em cinco profundidades, nas direções axial e tangencial.

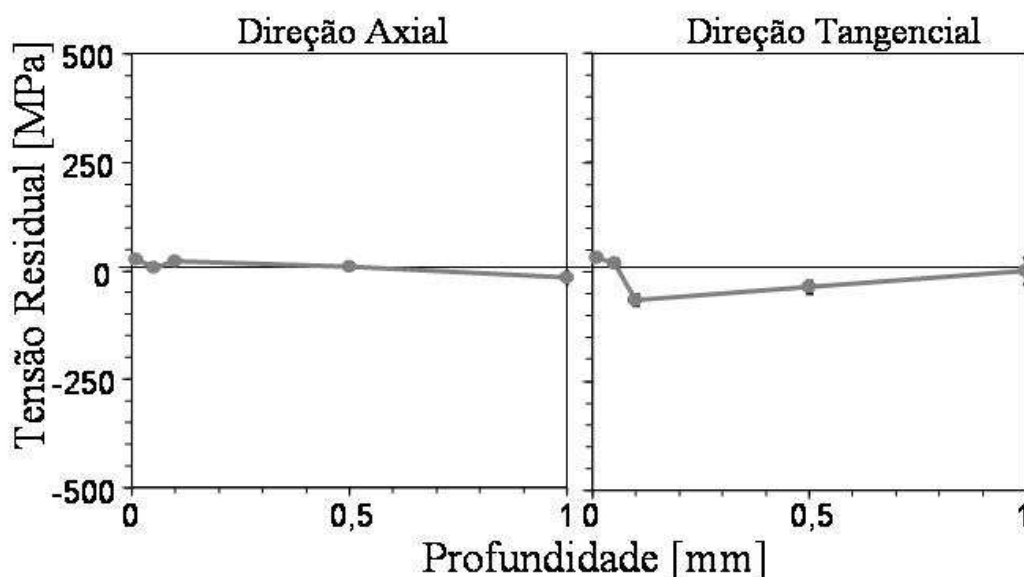


Figura 4.25: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Recozido, obtidas através do Método Micromagnético.

Neste caso, os resultados se apresentam dentro do esperado para este tipo de processo.

Apresentando distribuições de tensões residuais de baixa intensidade, mas não completamente nulas, com desvios padrões desprezíveis nestas distribuições. Para que as tensões residuais fossem completamente aliviadas seria necessário elevar consideravelmente o tempo de recozimento o que elevaria o custo do processo. Porém, percebe-se que as tensões residuais apresentam valores inferiores a 10% do limite de escoamento, na maioria das camadas, apresentando grande homogeneidade nas distribuições.

A Figura 4.26 apresenta os resultados, para a análise das tensões residuais através do Método Micromagnético, obtidos para o anel Temperado, em cinco profundidades, nas direções axial e tangencial.

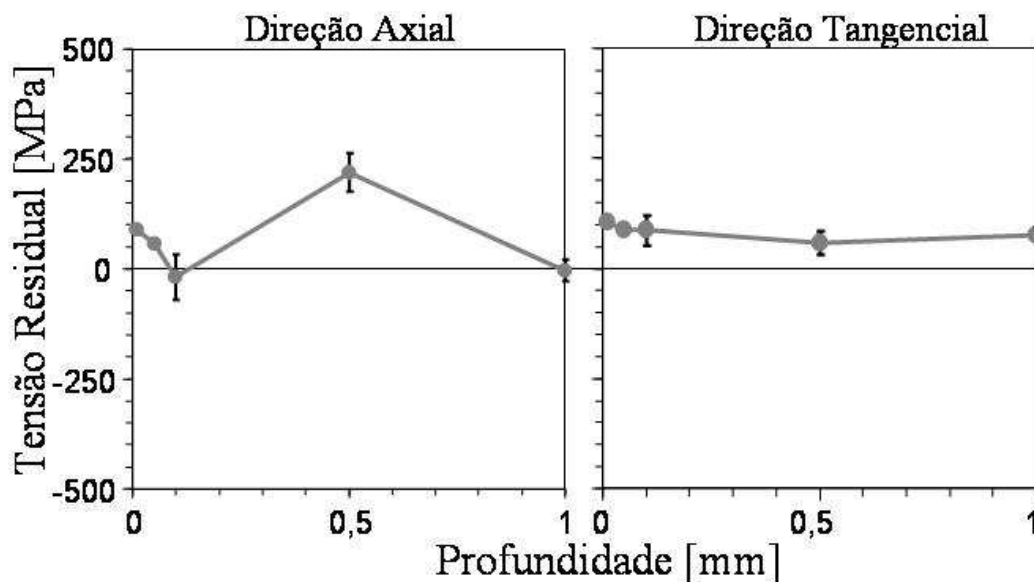


Figura 4.26: Distribuições médias das tensões residuais, em função da profundidade, para o anel Temperado, obtidas através do Método Micromagnético.

Neste caso, percebe-se a presença de tensões residuais trativas, de baixa magnitude, uniformemente distribuídas em função da posição angular, com exceção apenas das profundidades de 0,1 a 0,5 mm, onde encontraram-se desvios de até 46%. Esta variação pode ser associada às variações nas configurações dos domínios magnéticos, resultantes da transformação de fase, causada no material durante o processo de endurecimento.

Contudo, é importante notar que as tensões residuais presentes neste componente apresentam valores, praticamente, inferiores a 10% do limite de escoamento do material, podendo ser consideradas desprezíveis na maioria das aplicações práticas em geral.

5 DISCUSSÕES

Este trabalho objetivou a comparação entre técnicas de análise das tensões residuais. Para tal foram utilizadas amostras de anéis para rolamentos do aço ABNT 52100, provenientes de diferentes etapas do processo de manufatura destes anéis.

O trabalho é parte adicional do projeto SFB 570, o qual visa explorar as causas intrínsecas das distorções em componentes de aço durante os tratamentos térmicos de endurecimento.

Deste modo, qualquer quantificação e possibilidades de solução sobre os problemas relacionados às distorções necessitam de uma análise completa do processo de manufatura, incluindo as variações das distribuições de tensões residuais. Pois, sabe-se que as tensões residuais influenciam na ocorrência de distorções nos componentes mecânicos, mas como estas não são as únicas causadoras destas variações de forma, não é possível quantificar as distorções apenas determinando o estado de tensões residuais. Porém, em contra partida, não é possível quantificar e buscar solucionar os problemas de distorções sem quantificar o estado de tensões residuais. Assim, nenhuma discussão sobre a ocorrência ou não de distorções nas etapas finais do processo de manufatura dos componentes analisados foi efetuada neste trabalho.

No capítulo anterior, os resultados foram contestados segundo suas representatividade e confiabilidade. Porém, no desenvolvimento de uma técnica, a maneira mais correta de verificar a confiabilidade dos resultados é os comparando com os resultados obtidos através de uma técnica melhor estabelecida. Deste modo, as Figuras 5.1 e 5.2, a seguir, apresentam os resultados obtidos para a análise das tensões residuais presentes no anel Usinado A na direção tangencial, obtidos através do Método de Difração de raios X. Estes resultados são provenientes de trinta e cinco medidas superficiais, em função da posição angular, e de dois perfis de tensões residuais realizados nas posições angulares de 160° e 210°. A remoção de camada foi realizada, incrementalmente, através de um processo de polimento eletroquímico, onde, em média, foi removido 1 µm de material por minuto.

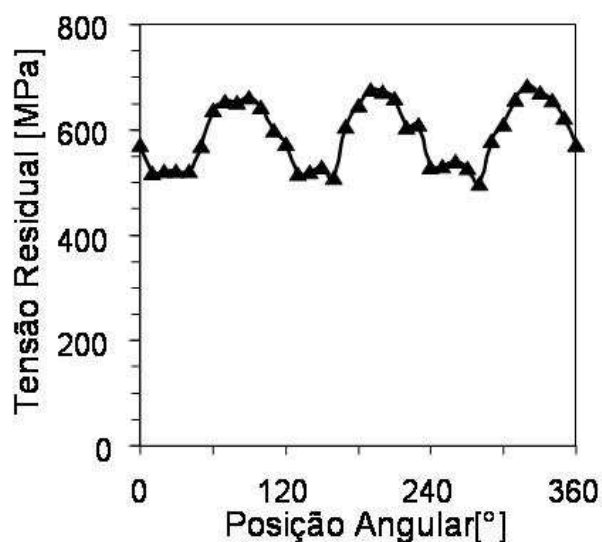


Figura 5.1: Resultados obtidos, através do Método de Difração de raios X, para a análise da variação das tensões residuais, com a posição angular, para o anel Usinado A, na direção tangencial.

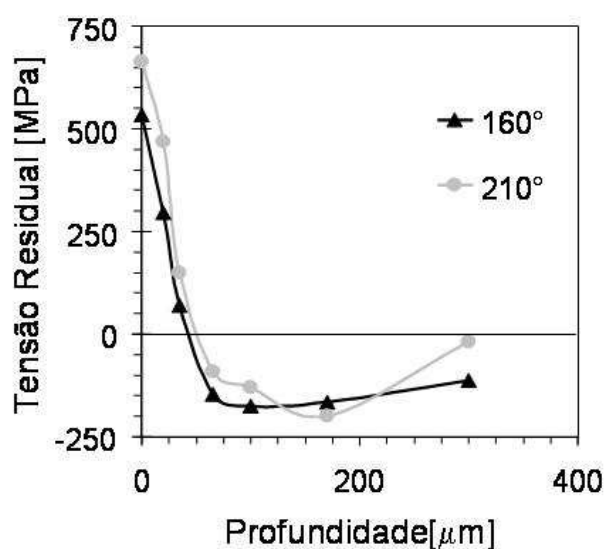


Figura 5.2: Resultados obtidos, através do Método de Difração de raios X, para a análise da variação das tensões residuais, com a profundidade, para o anel Usinado A na direção tangencial, nas posições angulares de 160° e 210°.

A amostra Recozida também teve a superfície analisada na direção tangencial através do Método de Difração de raios X. Os resultados estão apresentados na Figura 5.3. Convém lembrar que a análise da variação das tensões residuais com a profundidade para este tipo de material, através do Método de Difração de raios X, não foi realizada, por não ser relevante ao projeto, não justificando assim os gastos experimentais.

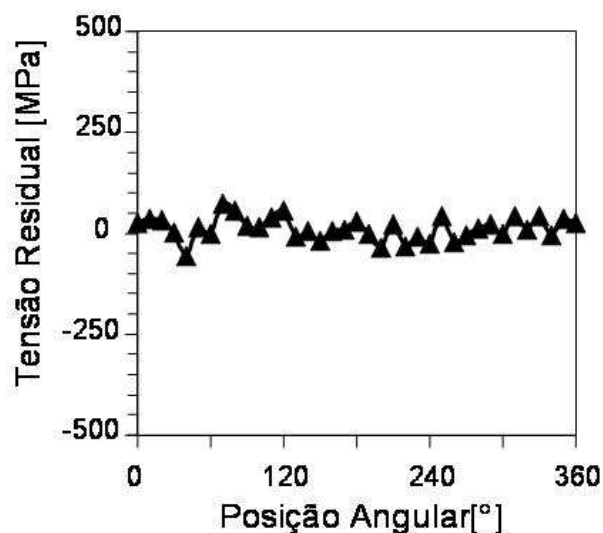


Figura 5.3: Resultados obtidos da análise das tensões residuais para o anel Recozido através do Método de Difração de raios X na direção tangencial.

Observação:

Antes de partir para a análise dos resultados obtidos através de cada método, é importante dizer que, independente da técnica utilizada, o conhecimento prévio a respeito das origens das tensões residuais e o estudo dos conceitos teóricos e práticos de cada método a ser utilizado, são de grande importância para a obtenção de resultados mais representativos e compreensíveis.

A partir disto, as discussões, a seguir, serão centradas, principalmente, na comparação dos resultados obtidos na análise das tensões residuais através métodos do Furo Cego e Micromagnético, com os resultados obtidos através do Método de Difração de raios X.

5.1 Análise das Tensões Residuais Através do Método do Furo Cego

Com base nas potenciais fontes de origens de tensões residuais, presentes no processo de manufatura dos anéis para rolamentos do aço ABNT 52100 e do conhecimento dos conceitos básicos deste método, pode-se verificar a representatividade dos resultados obtidos.

Em vista disto, a partir da análise das deformações (ver Figuras no Anexo II) sabemos que a ocorrência de deformações compressivas é um forte indicativo da presença de tensões residuais trativas na região. Quando as variações das deformações registradas nas três direções são muito diferentes, isto pode ser considerado como um indicativo da presença de tensões residuais distribuídas de forma não uniforme no volume de material analisado.

A partir deste conhecimento, parte-se para a interpretação dos resultados obtidos através de cada método de cálculo das tensões residuais, onde estes métodos são comparados, principalmente, segundo suas sensibilidades às variações nas distribuições de tensões residuais e aos erros de medida.

Observando-se as Figuras 4.4 a 4.18, percebe-se que o Método da Integral foi o que apresentou maior sensibilidade às variações de tensões residuais nas camadas superficiais (entre 0 e 0,5 mm), onde estes valores foram mais acentuados, em comparação com os outros métodos.

Porém, esta maior sensibilidade do Método da Integral, torna-se uma desvantagem quando ocorrem erros de medição, ou seja, desvios dos valores de deformações. Isto resultou em variações nas distribuições de tensões residuais em regiões onde, provavelmente, as tensões residuais deveriam apresentar valores constantes.

Segundo a literatura, a sensibilidade aos erros de medição, pode ser minimizada, reduzindo-se o número de incrementos utilizado para a usinagem do furo. Porém, devido às definições do Método da Integral, o qual considera que a variação de tensões residuais é considerada uniforme no interior de um dado incremento, a redução do número de incrementos reduzirá, também, a representatividade dos resultados.

O Método de Kockelmann apresentou curvas mais uniformes, que as apresentadas pelo Método da Integral, para os diferentes tipos de distribuições. Isto pode ser entendido, com base nos princípios destes métodos de cálculo, onde o primeiro é baseado na calibração experimental, e o segundo na calibração numérica, a qual é considerada mais idealizada.

O Método das Séries de Potências apresentou valores pouco representativos quantitativamente. Porém, qualitativamente este método pode ser utilizado para indicar a distribuição de tensões residuais em profundidades superiores à 1mm. Para determinar quantitativamente as distribuições de tensões residuais, em profundidades superiores a 1 mm, é necessário utilizar extensômetros tipo roseta maiores do que os utilizados neste trabalho.

A partir desta análise, os resultados obtidos através do Método de Kockelmann foram considerados mais representativos, em geral, para as diferentes distribuições. Sendo que este método apresentou sensibilidade às variações de tensões residuais semelhante à apresentada pelo Método da Integral, sendo ainda, menos sensível aos erros de medição.

Isto pode ser confirmado, comparando os resultados obtidos através do Método de Difração de raios X com os obtidos através do Método do Furo Cego. A Figura 5.4 apresenta esta comparação de resultados, para a direção tangencial do anel Usinado A, onde foram comparados os resultados obtidos através do Método de Difração de raios X, na posição angular de 160° , com os resultados obtidos através do Método do Furo Cego calculados através dos métodos da Integral, de Kockelmann e das Séries de Potências, até a profundidade de 0,6 mm.

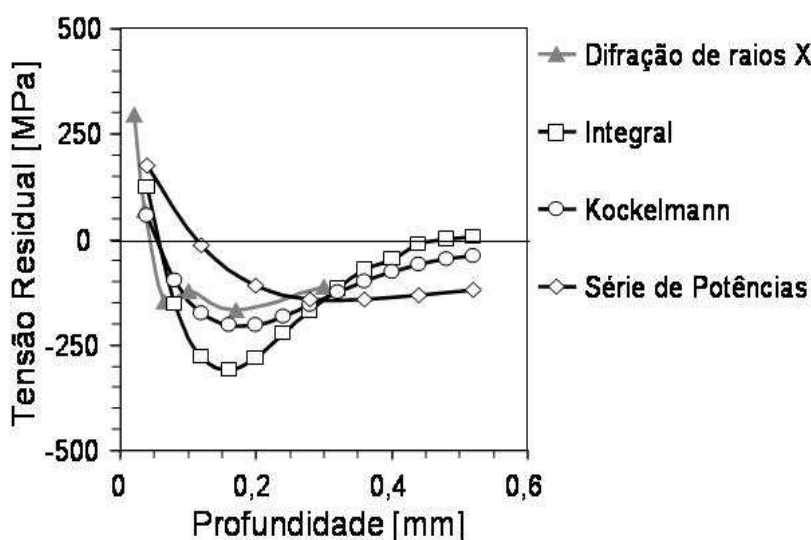


Figura 5.4: Comparação entre os resultados obtidos através dos métodos de Difração de raios X e do Furo Cego, para o anel Usinado A, na direção tangencial.

Percebe-se que, para o Método do Furo Cego, o Método de Kockelmann, foi o que apresentou a distribuição mais aproximada da distribuição apresentada pelo Método de Difração de raios X. Onde o Método da Integral apresentou valores mais intensos, o que pode ser justificado pela maior sensibilidade deste método. O Método das Séries de Potências apresentou resultados pouco representativos, neste caso, por não ser este um tipo de distribuição suave, para qual este método é indicado.

Com base nos resultados obtidos através do Método do Furo Cego, percebe-se que a escolha de um dado método de cálculo das tensões residuais está condicionada a maneira pela qual as tensões residuais estão distribuídas e nas propriedades físicas do componente. Para o anel Conformado o Método da Integral foi o método mais representativo, indicando a presença de tensões residuais compressivas de maior intensidade e a ocorrência da inversão do estado de tensões residuais em maiores profundidades. Para os anéis usinados o Método de Kockelmann foi o que apresentou melhores resultados. Para o anel Recozido, onde a

distribuição de tensões residuais pode ser considerada uniforme ou apresentando variação suave, o Método das Series de Potências apresentou resultados mais coerentes. Apesar das dificuldades encontradas na usinagem dos furos em materiais endurecidos, como o Anel Temperado, percebe-se que ainda assim o Método de Kockelmann (Figura 4.17) apresentou resultados coerentes, dentro da escala esperada para este tipo de material.

5.2 Análise das Tensões Residuais Através do Método Micromagnético

Assim como ao Método do Furo Cego, a velocidade de resposta do Método Micromagnético está condicionada ao conhecimento prévio da distribuição de tensões residuais e da relação apresentada entre estas tensões e os parâmetros micromagnéticos medidos.

Na Figura 4.19 temos a representação da variação de M_{\max} em função da posição angular na camada superficial de todas as amostras. Qualitativamente, a distribuição de M_{\max} é uma indicação da distribuição de tensões residuais nesta camada.

Nota-se que, a variação de M_{\max} na direção tangencial do anel Usinado A é semelhante (de maneira oposta) a variação de tensões residuais na mesma região. Para os demais anéis se percebe que a variação de M_{\max} é menos acentuada.

A coercitividade relativa (H_{cm}) indica a variação microestrutural do material em função da posição angular, onde a queda significativa na intensidade deste sinal para o Anel Temperado pode ser explicada pela mudança de uma microestrutura esferoidizada para outra, predominantemente, martensítica, como mostra a Figura 3.1.

Estas informações foram de grande utilidade para a verificação da representatividade dos valores obtidos após o procedimento de calibração. Sobre o procedimento de calibração, é preciso aceitar que temos um erro associado à utilização de resultados obtidos através do Método do Furo Cego, principalmente para o Filtro de frequência de análise de 10 MHz onde os dados foram extrapolados para a profundidade de pele relativa a este filtro. Contudo os erros associados podem ser considerados mínimos, assumindo-se que não temos uma variação significativa das tensões residuais entre as profundidades de 0 a 40 μm . Isto é verdadeiro para todos os anéis com exceção dos anéis usinados. Por este motivo, foram utilizados os resultados provenientes do Método de Difração de raios X, para a calibração dos ensaios de alta frequência nos anéis usinados.

Devido à variação das propriedades físicas em cada etapa do processo, a calibração deve ser efetuada utilizando dados de cada etapa, o que condiciona a utilização do método para aplicações onde se necessite de um grande número de análises, como no controle de qualidade, por exemplo.

A partir das equações de calibração (Tabela IV.1), percebe-se que, geralmente, as variações de M_{\max} possuem maior influência nas variações das tensões residuais.

Observando-se as Figuras 4.22 a 4.26, percebe-se que, para todos os anéis, os maiores desvios são provenientes das medidas nas regiões superficiais. Isto é justificado pelo fato de ser a superfície a região que sofre, em geral, as maiores deformações durante o processo de manufatura. Para o anel Conformado, Figura 4.22, nota-se que as distribuições apresentam desvios padrões consideráveis até uma profundidade de 0,1 mm, devido, principalmente, as consideráveis variações nos gradientes de deformação e recuperação elástica nesta região.

Com exceção da camada superficial, as distribuições se apresentam praticamente constantes à medida que se variam as posições angulares para todas as profundidades. Nos Anéis Recozido e Temperado as tensões residuais apresentam grande uniformidade onde os desvios padrões encontrados são, principalmente, devido ao equilíbrio das tensões residuais no componente.

A veracidade destes resultados pode ser verificada comparando-os com os resultados obtidos através do Método de Difração de raios X.

A Figura 5.5, a seguir, apresenta a variação das distribuições de tensões residuais em função da posição angular, determinadas através dos métodos de Difração de raios X e Micromagnético, para o anel Usinado A na direção tangencial.

Percebe-se a grande representatividade apresentada pelo Método Micromagnético, onde os resultados obtidos através dos diferentes métodos, possuem uma ótima correlação entre si.

Estes resultados também comprovam a grande utilidade do Método Micromagnético, o que pode ser verificado, comparando-se a representatividade dos resultados e o tempo de análise. A Figura 5.5, por si só, comprova a representatividade dos resultados e, levando-se em conta, que foram utilizados apenas quatro valores, obtidos através do Método de Difração de Raios X, para a calibração do Método Micromagnético. Considerando-se, agora, o tempo

médio de três horas por ponto analisado através do Método de Difração de raios X, temos um total de 105 horas, utilizadas para a realização destas análises. O tempo médio para a análise do Método Micromagnético é, em geral, inferior a um minuto por ponto, somando-se as dose horas utilizadas para as medidas necessárias para o processo de calibração (o qual é realizado uma única vez, para o material neste estado), temos um tempo médio utilizado inferior a treze horas, ou seja, temos uma economia de tempo de 87%, utilizando-se o Método Micromagnético de análise das tensões residuais.

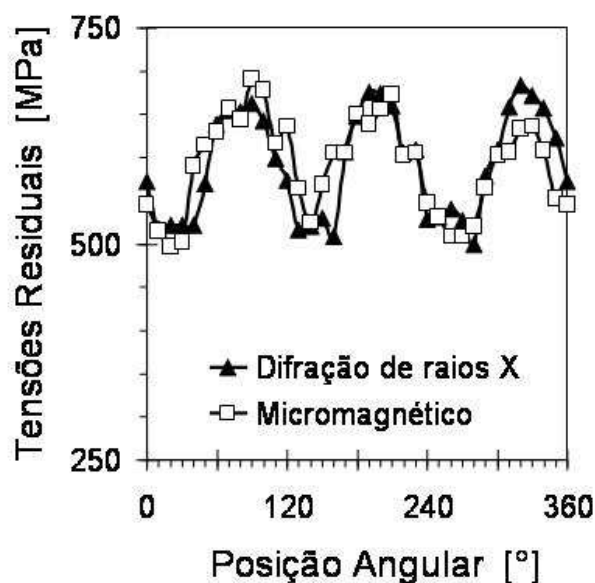


Figura 5.5: Comparação entre os resultados obtidos através dos métodos de Difração de raios X e Micromagnético, para o anel Usinado A, na direção tangencial.

Comparando-se, os resultados obtidos na análise das tensões residuais através dos métodos de Difração de raios X e Micromagnético para o anel Recozido, percebe-se que a sensibilidade do Método Micromagnético é reduzida consideravelmente.

A Figura 5.6, a seguir, apresenta as variações das tensões residuais, com a posição angular, obtidas através dos métodos de Difração de raios X e Micromagnético, para o anel Recozido na direção tangencial. Percebe-se, que a distribuição apresentada pelo Método Micromagnético possui uma variância inferior à distribuição apresentada pelo Método de Difração de raios X. Porém, observando-se as Figuras 4.19 e 4.20, nota-se que os sinais micromagnéticos medidos apresentam distribuições (principalmente M_{max}) mais aproximadas da distribuição de tensões residuais obtida através do Método de Difração de raios X. Portanto, a menor sensibilidade apresentada pelo Método Micromagnético, neste caso, ocorre

devido à deficiência do método de regressão linear, quando temos valores oscilantes, muito próximos de zero.

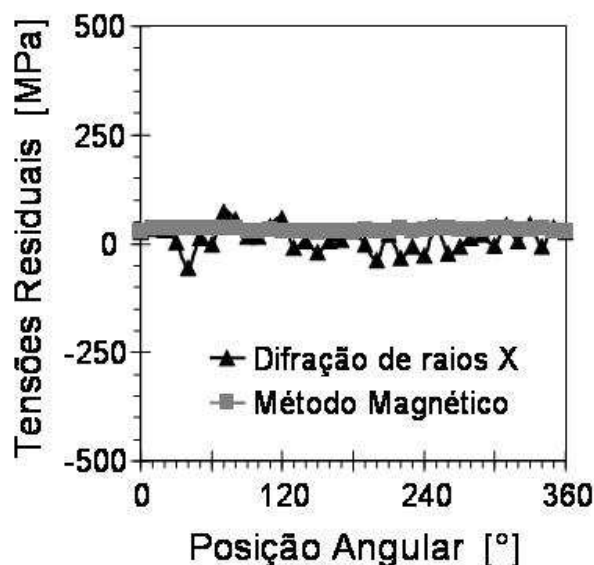


Figura 5.6: Comparação entre os resultados obtidos através dos métodos de Difração de raios X e Micromagnético, para o anel Recozido, na direção tangencial.

Esta deficiência apresentada pelo método de regressão linear pode ser reduzida através da utilização de um outro método (matemático ou experimental) de calibração experimental. Contudo, devido à magnitude destas tensões residuais, estas variações nas distribuições obtidas por diferentes métodos podem ser consideradas insignificantes, em geral.

Observação:

Existem controvérsias sobre a verificação da profundidade de pele coincidir com a profundidade real da medida. Visto que, geralmente o sinal provém de uma integração dos saltos Barkhausen ocorrendo em toda a profundidade, porém foram utilizados dados pontuais de calibração. Portanto, os resultados aqui apresentados foram considerados como sendo provenientes de medidas pontuais.

5.3 Comparação Entre os Métodos de Análise

Baseando-se nos critérios descritos por Lu⁶, é importante verificar se as técnicas a serem utilizadas são representativas segundo: Os tipos de tensões que podem ser determinados, os tipos de materiais que podem ser analisados, os tempos e custos de

análise, tipo de intervenção provocada pela técnica, a reprodutibilidade e a confiabilidade dos métodos, principalmente.

A hipótese assumida neste trabalho (e mundialmente considerada) foi de que o Método de Difração de raios X apresenta maior precisão nos resultados obtidos. Este método é indicado para a análise de materiais cristalinos, ou semi-cristalinos, que produzam padrões de difração na escala angular exigida. É capaz de determinar, de forma reprodutível, as macrotensões residuais e estimar as microtensões residuais. O método é restrito às medidas superficiais, portanto, medidas em outras profundidades só são possíveis através da remoção de camada, elevando consideravelmente o tempo de resposta.

O Método do Furo Cego apresenta maior velocidade de resposta, sendo o tempo médio de análise de aproximadamente uma hora por furo. É indicado para a análise de qualquer tipo de material no qual um pequeno furo possa ser usinado sem que ocorra a fratura ou a plastificação acentuada do material nas vizinhanças do furo. É um método destrutivo, ou semidestutivo, de baixa reprodutibilidade e baixo custo relativo, destinado à determinação das macrotensões residuais apenas. O volume analisado é maior do que os volumes analisados através dos Métodos de Difração de raios X e Micromagnético, em geral. Contudo este método é capaz de determinar, em um curto espaço de tempo, as tensões residuais principais em profundidades maiores, determinando ainda as direções principais.

O Método Micromagnético é condicionado apenas a análise de materiais ferromagnéticos, porém, este método tem fácil aplicação, boa sensibilidade, baixo custo relativo e um volume analisado que depende da geometria do sensor utilizado. O processo de calibração limita sua utilização a aplicações, em geral, para situações onde se necessita de um grande número de medidas em componentes que apresentem as mesmas características físicas.

Um importante estudo comparativo pode ser realizado quando se comparam as variações das tensões residuais com a profundidade, determinadas através destes três métodos de análise. Isto pode ser visualizado na Figura 5.7, onde se percebe a grande correlação entre os resultados encontrados neste trabalho com os resultados anteriores, provenientes do projeto SFB 570, obtidos através do Método de Difração de raios X.

Todos os métodos apresentam resultados satisfatórios e, analisando-se as vantagens e limitações de cada método, os resultados apontam para a necessidade do uso complementar

dos mesmos para a completa caracterização das variações nas distribuições de tensões residuais em anéis para rolamentos durante o processo de manufatura destes componentes.

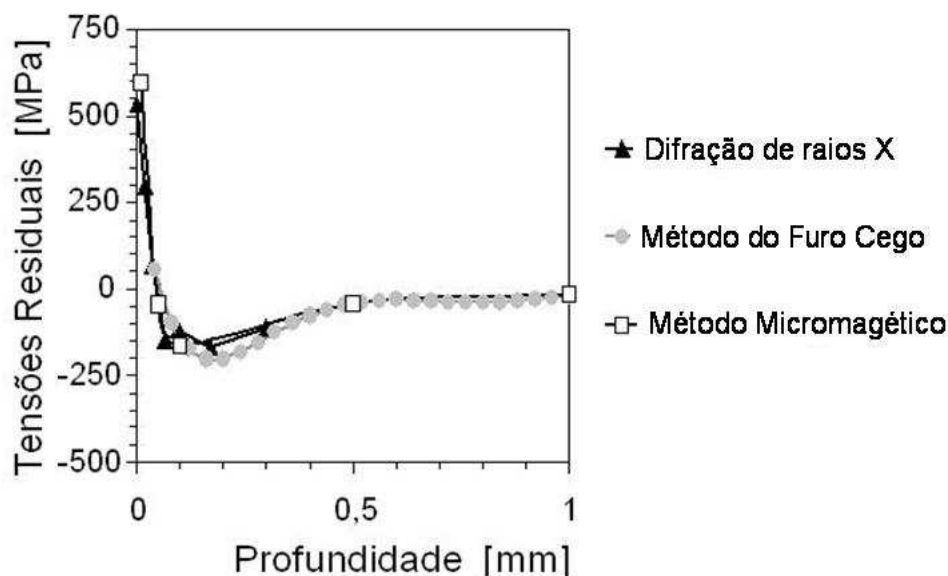


Figura 5.7: Comparação dos resultados obtidos para a análise das tensões residuais no Anel Usinado A, na direção tangencial, através de três métodos diferentes.

Deste modo, dentro do projeto SFB 570, seria interessante se utilizar o Método de Difração de raios X para as medidas superficiais (em um menor número de pontos do que os trinta e cinco pontos normalmente analisados por amostra) e com a intenção de construir perfis de tensões residuais buscando a obtenção de dados de grande precisão que possam ser utilizados em comparações com os dados provenientes de outros métodos.

O Método do Furo Cego pode ser utilizado para a obtenção de resultados confiáveis em maiores profundidades (até dois milímetros geralmente), onde um número maior de análises pode ser realizado. Visto que a taxa de remoção de material para o processo de eletropolimento utilizados neste projeto foi de $1 \mu\text{m}/\text{min}$, em geral, são necessários 100 minutos, para uma remoção de aproximada de 0,1 mm. Esta baixa taxa de remoção eleva consideravelmente a velocidade de resposta do método de Difração de raios X.

O Método Micromagnético seria utilizado para fornecer um número maior de resultados, reduzindo consideravelmente o número de análises efetuadas através dos métodos anteriores, podendo ainda, aumentar consideravelmente o número de amostras e pontos a serem analisados. Possibilitando ainda, a realização de medidas não destrutivas na região interna dos anéis para rolamentos, o que não é possível através dos métodos de Difração de raios X e do Furo Cego, atualmente.

6 CONCLUSÕES

Com base na revisão bibliográfica e nos resultados experimentais obtidos neste trabalho podemos concluir que:

A determinação das tensões residuais é de grande relevância para o desenvolvimento e melhoria da confiabilidade dos componentes mecânicos de engenharia;

Todas as amostras apresentaram distribuições de tensões residuais coerentes com o esperado, a partir do conhecimento geral, da origem das variações de tensões residuais durante as diferentes etapas do processo de manufatura de anéis para rolamentos;

O Método do Furo Cego, o qual apresentou grande velocidade de resposta e a possibilidade de se obter a distribuição de tensões residuais em grandes profundidades, mostrou resultados de grande coerência quando comparados aos resultados obtidos através do Método de Difração de raios X;

A escolha do método de cálculo das tensões residuais a ser utilizado, para o Método do Furo Cego, é condicionada pelas características do campo de tensões residuais atuando no componente e a precisão dos resultados obtidos nas medidas de deformações;

Contudo neste trabalho, de um modo geral, o Método de Kockelmann foi o que apresentou os melhores resultados;

Os resultados obtidos através do Método Micromagnético apresentaram grande correlação com os resultados obtidos através do Método de Difração de raios X, provando a grande representatividade deste método;

A maior utilidade do Método Micromagnético, esta voltada para análises em diferentes camadas do componente, onde é necessário um grande número de experimentos, em geral;

De maneira geral, com exceção dos anéis usinados nas camadas superficiais, a distribuição de tensões residuais apresentou grande uniformidade em função da posição angular;

Uma simples comparação entre métodos mostrou que o Método Micromagnético tem grande reprodutibilidade e apresentou o melhor tempo de resposta, o Método do Furo Cego forneceu um número maior de informações, provenientes maiores profundidades, em um rápido intervalo de tempo, não necessitando de uma etapa posterior de calibração como no caso do Método Micromagnético, porém o Método de Difração de raios X continua sendo considerado mundialmente como o método que apresenta a melhor precisão nos resultados.

É difícil prever qual método é o mais adequado para uma dada aplicação, a escolha do método a ser utilizado para uma dada aplicação depende de vários fatores, contudo os resultados, aqui apresentados, apontam para a necessidade do uso complementar das várias técnicas de análise das tensões residuais para a completa caracterização da distribuição destas tensões em componentes mecânicos de engenharia.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Das várias perspectivas que se abrem a partir deste trabalho, podemos citar as seguintes sugestões:

- Dar continuidade ao trabalho realizado, determinando as variações de tensões residuais em anéis para rolamentos provenientes de outras etapas do processo de manufatura;
- Adaptar os equipamentos para a realização da determinação das tensões residuais na superfície interna dos anéis para rolamento;
- Adaptar os equipamentos e os procedimentos para a determinação de tensões residuais em outros componentes, com geometrias, distribuição de tensões e propriedades físicas diferentes;
- Verificar a relação entre a distribuição de tensões residuais e a ocorrência de distorções nos componentes durante as etapas do processo de manufatura;
- Adaptar os procedimentos para as medidas em campo;
- Desenvolver o Método Micromagnético e o Método de Difração de raios X no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS;
- Utilizar os métodos aqui desenvolvidos para a caracterização geral de componentes mecânicos e para a resolução de problemas associados à presença de tensões residuais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Macherlauch, E., Kloos, K. “Origin, Measurement and Evaluation of residual Stress”. Residual Stress em: Science and Technology, Vol. 1, p 3–27, Alemanha 1987.
- 2 Noyan, I. C., Cohen, J. B., “The Nature of Residual Stress and its Measurement”, Residual Stress, Srpinger Verlag, 1987, p. 1–17.
- 3 “Residual Stress”, Extraído de: http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.htm#References, Acessado em 09/08/2003.
- 4 Withers, P., Bhadeshia, K. “Residual Stress, Part 1...” Material Science and Technology, Vol. 17, 2001, p 355–365.
- 5 Hauk, V. “Structural and Residual Stress Analysis by Non-destructive Methods...” ELSEVIER, 1997.
- 6 Lu, J. “Handbook of Measurement of Residual Stresses“. SEM, Inc. 1996.
- 7 Bhadeshia, H. K. D. H., “Material Factors” Em: Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, 2002, p. 3–9.
- 8 Hauk, V., Höller, P., Macherlauch, E., “Measuring Techniques of Residual Stresses–Present Situation and Future Aims” ICRS5, p. 231–242.
- 9 Withers, P., Bhadeshia, K. “Residual Stress, Part 2...” Material Science and Technology, Vol. 17, 2001, p 366–375.
- 10 Ruud C., “Measurement of Residual Stresses...” Em: Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, 2002, p. 99–117.
- 11 Modenesi, P. J. “Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico”, Apostila de Aula, UFMG, 2001, 24p. Extraído de: http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf, Acessado em: 24/08/2004
- 12 Lima, T. R. S. “Análise da Integridade Estrutural de Tubos Autofretados”, Dissertação de Mestrado, PPGEM–UFRGS, 2000, 71p.
- 13 Fuchs, H. O., et al, “Metal Fatigue in Engineering”, Wiley–Interscience Publication 2ª Edição, 2000, 496 p.
- 14 “A Review of Residual Stress Measurement Methods–A Guide to Technique Selection”, Edited by Tony Fry, National Physical Laboratory, UK, 2001.

15 Schajer, G. S., Albert, J., "Stress Determination for Coatings" Surface Engineering, Vol. 5, ASM Handbook, ASM International, 1994, p. 647–653.

16 "About Pre Stress", Extraído de: <http://www.ensped.utt.fr/aboutprestress/aboutprestressf.htm>, Acessado em:9/09/03

17 "Residual Stress", Extraído de: <http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/residualstress/>, Acessado em 26/05/2003.

18 Brinksmeier, E., et al, "Residual Stresses Measurement and Causes in Machining Processes", CIRP Annals 31 (1982), p. 491–510.

19 Webster, G. A., Ezeilo, A. N., "Residual Stress Distribution and Their Influence on Fatigue Lifetimes". International Journal of Fatigue, Vol. 23, 2001, p. 375–383.

20 Li, J., et al "An Understanding of the Effect of Residual Stress Induced by Shot Peening on Fatigue Strength", *Proc. Fourth Int. Conf. on Residual Stresses*, Baltimore, MD, USA (8–10 June 1994) 1002–1007.

21 Mordfin, L., "Measurement of Residual Stresses: Problems and Opportunities" in Residual Stress for Designers and Metallurgists, ASM, Proceedings of a Conference Held, USA, 1980, p. 189–210.

22 Weiss, V., James, M. R., "Residual Stresses Fatigue and Fracture", Em: Residual Stresses in Science and Technology, Vol. 1, 1987, p. 41–55.

23 Torres, M. A. S., Voorwald, H. J. C., "An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel." International Journal of fatigue, Vol. 24, 2002, p. 877–886.

24 Löhe, D., Vöhringer, O. "Stability of Residual Stresses" Em: Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, 2002, p. 54–69.

25 Prevéy, P. S., "X-ray Diffraction Residual Stress techniques" Metals Handbook, ASM, 1986, p. 380–392.

26 Schajer, G. S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stress Using The Hole Drilling Method. Part I–Stress Calculation Procedures." Transaction of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 110, 1988, p. 338–343.

27 Schajer, G., " Stress Calculation Error Analysis for Incremental Hole-Drilling Residual Stress Measurements", Journal of Engineering Materials and Technology, Volume 118, 1996, p. 120–126.

28 Schajer, G.S. and Tootoonian, M., "A New Rosette Design for More Reliable Hole-Drilling Residual Stress Measurements", Experimental Mechanics, Vol. 37, No. 3, 1997, pp. 299–306.

- 29 Measurements Group Tech Note TN-503: Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, 1993.
- 30 Sasaki, K. et al. "The Accuracy of Residual Stress Measurement by the Hole Drilling Method", *Experimental Mechanics*, Vol. 37 (3), 1997, p. 250–257
- 31 Kornmeier, M., et al. "Plasticity Effects on Residual Stress Results Using Different Hole Drilling Evaluation Methods" *Residual Stresses–ICRS–6*, p. 1188–1195.
- 32 Beghini, M., Bertini, L., "Recent Advances in The Hole Drilling Method for Residual Stress Measurement". *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 7 (2), 1998, p. 163–172.
- 33 Vangi, D., Ermini, M., "Plasticity Effects in Residual Stress Measurement by the Hole Drilling Method", *Strain*, Vol. 36 (2), 2000, p. 55–59.
- 34 Beghini, M., Bertini, L., Raffaelli, P., "Numerical Analysis of Plasticity Effects in the Hole–Drilling Residual Stress Measurements", *Journal of Testing and Evaluation*, 1994, p. 522–529.
- 35 Fry, T., "Measurement Good Practice Guide No. 52 " *National Physical Laboratory, UK*, 2000.
- 36 ASTM E837-01, "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method", *American Society For Testing And Materials Standards, Philadelphia*, 2001.
- 37 Schajer, G.S., "Application of Finite Element Calculation to Residual Stress Measurements", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 103 (2), 1981, p. 157–163.
- 38 Flaman, M. T., "Investigation of Ultra High Speed Drilling for Residual Stress Measurements by the Center Hole Method", *Experimental Mechanics*, 22 (1), 1982, p. 26–30.
- 39 Schwarz, T., Kockelmann, H., "Die Bohrlochmethode–ein für viele Anwendungsbereiche optimales Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen" *MTB von HBM* 29, Heft 2, 1993, p. 33–38.
- 40 Kockelmann, H., "Mechanical Methods of Determining Residual Stresses". *Proceedings of "The Fifth International Conference on Residual Stresses" (ICRS–5)*, Sweden Linköping; 1997, p.721–725.
- 41 Nelson, D. V., Fuchs, E. A., Makino, A., "An Overview of the Holographic–Hole Drilling Technique for Residual Stress Measurement" *Proceedings of the Fourth International Conference on Residual Stresses (ICRS–4)*, Baltimore, Maryland, USA, 1994, p. 63–71.
- 42 Lin, S.T, Hsieh, C.T, and Hu, C.P, "Two holographic blind hole methods for measuring residual stresses." *Experimental Mechanics*, 1994, p.141–147.

- 43 Roldo, L., “Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários”, Dissertação de Mestrado, PPGEM–UFRGS, 1998, 98p.
- 44 Honner, M., Litos, P., Svantner, M., “Thermography Analyses of The Hole-Drilling Residual Stress Technique” *Infrared & Technology*, Vol. 45, 2004, p. 131–142.
- 45 Tootonian, M., Schajer, G. S., “Enhanced Sensitivity Residual–Stress Measurements Using Taper–Hole Drilling”, *Experimental Mechanics*, 1995, p. 124–129.
- 46 Flaman, M. T., Mills, B. E., Boag, J. M., “Analysis of Stress–Variation–With Depth Measurements Procedures for the Center Hole–Drilling Method of Residual Stress Measurements.” *Experimental Techniques*, 1987, p. 35–37.
- 47 Prévey, P. S. “Residual Stress Distribution Produced by Strain Gage Surface Preparation”. *Proceedings of the 1986 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*, Society for Experimental Mechanics, Inc., Bethel, CT, 1986, p. 216–223.
- 48 Measurements Group Instruction Bulletin B–129, “Surface Preparation for Strain Gage Bonding”
Extraído de:
http://www.vishay.com/brands/measurements_group/guide/ib/b129/129index.htm. Em:
18/06/2003.
- 49 Boag, J. M., Flaman, M. T., Herring, J. A. in: *Handbook of Residual Stress and Deformation*, ASM, 2002, p. 1–6.
- 50 Schajer, G. S., “Measurement of Non-Uniform Residual Stress Using The Hole Drilling Method. Part II–Applications of the Integral Method.” *Transaction of ASME, Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, October 1988, p. 344–349.
- 51 Synt Technology, “Manual do Equipamento MTS 3000”, Itália, 2002.
- 52 Procter, E., Beaney, E. M., "Recent Developments in Center–hole Technique for Residual-stress Measurement." *Experimental Techniques* 6, 1982, p. 10–15.
- 53 Grum, J., Zerovnik, P., Fefer, D., “Identification of Structural Changes and Residual Stresses Based on Magnetic Barkhausen Noise” *Proceedings of "The Fifth International Conference on Residual Stresses" (ICRS–5)*, Sweden; Linkoping; 1997, ed. T. Ericsson, M. Odén and A. Anderson (1998); p.694-702.
- 54 Pomorski, K., Peech, T., “Barkhausen–Noise Method for Estimation of Direction of Residual Stresses in Surface Layer”, *Proceedings of "The Fifth International Conference on Residual Stresses" (ICRS–5)*, Sweden; Linkoping; 1997, ed. T. Ericsson, M. Odén and A. Anderson (1998); p. 333–340.
- 55 Pacyna, J., Mokoza, A., Wojtas, A., “A Residual Stress Measurement in Steel Mill Rolls Using Magnetic Barkhausen Analysis” Extraído em 18/04/2003 de:
<http://www.ndt.net/article/v04n08/wojtas/wojtas.htm>

- 56 Rolim, J., “Materiais Magnéticos” Apostila de aula, Extraída em 14/04/2004 de: <http://www.ucl.br/download.cfm?dira=Documentos\MateriaisEletricos\>.
- 57 Cullity, B.D. “Introduction to Magnetic Materials”, Londres: Addison-Wesley Publishing Company, 1972. 666p.
- 58 Gauthier, J., et al “Measurement of Residual Stress in Steel Using the Magnetic Barkhausen Noise Technique”, NDT & International, Vol, 31 (1), 1998, p. 23–31.
- 59 Silva Jr., “Determinação de Tensões Residuais em Materiais Ferromagnéticos pelo Efeito Barkhausen”, Dissertação de Mestrado, UFMG, Brasil, 1998, 160p.
- 60 Sommer, R. L., “O Efeito Barkhausen em Ferromagnetos”, Dissertação de Mestrado, Instituto de Física–UFRGS–Brasil, 1986, 116 p.
- 61 Silva Jr., S., Mansur, T. R., Palma, E. S., “Determining Residual Stresses in Ferromagnetic Materials by Barkhausen Noise Measurement”. Extraído de: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn478/idn478.htm> . Em 18/04/2003
- 62 Titto, K., “Use of Barkhausen Effect in Testing for Residual Stresses and Materials Defects”, Em: Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, 2002, p. 27–35.
- 63 “Technisches Handbuch und Bedienungsanleitung, Ferrotest–Dur”, Manual do Equipamento, Tiede, Alemanha, 1991, 41 p.
- 64 Lochmann, C., Nitschke-Pagel, Th., Wohlfahrt, H., “Characterization of Residual Stress Relaxation in Fatigue Loaded Welded Joints by X-ray Diffraction and Barkhausen Noise Method” ECRS 5: Proceedings of the Fifth European Conference on Residual Stresses. 2000.
- 65 Jiles, D. C., “Review of Magnetic Methods for Nondestructive Evaluation”, NDT International Vol. 21, (5), 1988, p. 311–319.
- 66 Bach, G., Goebbels, K., Theiner. W. A., “Characterization of Hardening Depth by Barkhausen Noise Measurements”, Materials Evaluation. Vol. 46, 1998, p. 1576–1580.
- 67 Venginovich, U. L., Knyazev, M. A. Vishenesky, A. L. “The Principles of Depth Layers by the Magnetic Noise Method” Res. Nondestr. Eval. Vol. 4 (19), 1992, p. 19–27.
- 68 Hutchings, I. M., “Tribology–Friction and Wear of Engineering Materials”, Ed. Arnold, 1996, 273 p.
- 69 Mayr, P., et al, “SFB 570 Distortion Engineering–Arbeits- und Ergebnisbericht”, Universität Bremen, Bremen, 2003, 575 p.
- 70 Brinksmeier, E., et al, “Simulation der Werkstückdeformation beim Spanen von Ringen”, HTM, Vol. 58, 2003, p. 271–275.
- 71 Brinksmeier, E., et al, “Einfluss der Drehbearbeitung auf den Verzug von 100Cr6–Ringen” HTM, Vol. 58, 2003, p. 266–270.

- 72 Metals Handbook, “Properties and Selection...” Vol. 1, 10a Edição, 1990, p. 152.
- 73 Klümper-Westkamp, H., “Entwicklung und Anwendung eines Nitriersensors zur in-situ-Erfassung des Nitrierprozesses“ PHD Thesis, University of Bremen, 1989.
- 74 Beer, P. F., Johnston, R. E., Vector Mechanics for Engineers, Statics and Dynamics, Editora: McGraw–Hill Science, USA, 2003, 1312 p.
- 75 Prevéy, P. S., “X-ray Diffraction Residual Stress techniques“ Metals Handbook, ASM, 1986, p. 380–392.
- 76 Prevéy, P. S., “X-ray Diffraction Residual Stress techniques“ Metals Handbook, ASM, 1986, p. 380–392. Fry, T., “Measurement Good Practice Guide No. 53 “ National Physical Laboratory, UK, 2000.
- 77 Fry, T., “Measurement Good Practice Guide No. 53 “ National Physical Laboratory, UK, 2000.
- 78 Prévey, P. S., “Current Applications of X-ray Diffraction Residual Stress Measurement”, Development in Materials Characterization Technologies, ASM International, Materials Park, 1996, p. 103–110.
- 79 Rocha, A. S., Hirsch, T. K., “Fast in situ X-ray diffraction phase and stress analysis during complete heat treatment cycles of steel”, Mat. Science and Engineering:A, submitted to publication, 2004.
- 80 Lu, J., Rehrig, D., “ A Review of Recent Developments and Applications in the Field of X-ray Diffraction for Residual Stress Studies”, Journal of Strain Analysis, Vol. 33, No. 2, 1998, p. 127–136.
- 81 Peck, C. A., “Practical Aspects of Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction” Em: Handbook of Residual Stress and Deformation, ASM, 2002, p. 7–9.
- 82 Hanabusa, T. “ Japanese Standard for X-ray Stress Measurement”, in: Residual Stresses–ICRS6, p. 181–188.
- 83 Moore, M. G., Evans, W. P., “Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis”, SAE Transactions, Vol. 66, 1958.
- 84 Sikarskie, D. L., “ On a Series Form of Correction to Stress Measured Using X-ray Diffraction”, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 239, 1967, p. 577–580.
- 85 Fathallah, R., et al, “Comparison of Residual Stresses Determined by X–ray Diffraction, Neutron Diffraction and The Hole Drilling Method in Aerospace Shot Peened Materials”, Proc. 4th Int Conf. on Residual Stress, Baltimore, 1994, p. 834–843.

ANEXO I

I.1 Determinação das Tensões Residuais por Difração de raios X

I.1.1 Visão Geral

Na análise das tensões residuais através da difração de raios X a deformação do retículo cristalino é medida e as tensões residuais associadas são determinadas a partir das constantes elásticas do material, assumindo-se que a deformação ocorreu no regime linear elástico^{25,75,76}.

Devido ao baixo poder de penetração dos raios X na matéria, os feixes difratados são provenientes de baixas profundidades (de 1 a 50 μm) e a determinação das tensões residuais pelo método de difração de raios X pode ser considerada uma técnica de medida superficial, assumindo-se a condição de tensão plana^{5,6,25,77,78}.

Este método é aplicável a materiais cristalinos ou semi-cristalinos, com grãos relativamente finos, que produzem difração em qualquer direção da superfície da amostra^{5,6,25,26}. Pode ser utilizado para medir macro e microtensões residuais. As macrotensões são determinadas a partir da variação da posição dos picos de difração enquanto que as microtensões são determinadas a partir da variação da largura dos picos de difração^{5,25,75}.

I.1.2 Breve Histórico

As aplicações do método de difração de raios X nas medidas práticas de tensões residuais em problemas de engenharia começaram por volta do início dos anos 1950. O desenvolvimento de difratômetros comerciais e o trabalho do comitê de avaliação de fadiga e design da SAE resultaram na aplicação extensiva nas indústrias automotivas nos anos de 1960. Na década de 1970 a difração de raios X era aplicada com frequência nas indústrias aeroespacial e nuclear. Desde então os últimos anos foram marcados pelo desenvolvimento de equipamentos portáteis, detectores mais sofisticados e medidas “In Situ” através da difração de raios-X em materiais cristalinos^{5,6,75,79}.

I.1.3 Princípios Físicos

Quando um feixe monocromático de raios X interage com um material cristalino, ocorre a difração do feixe para ângulos específicos. Isto ocorre de acordo com a lei de Bragg (Equação I.1), a qual determina os ângulos onde as ondas de raios X, de comprimento de onda, λ , têm uma interferência construtiva para uma dada família de planos com distância interplanar, d . “ θ ”, o ângulo de Bragg, é o ângulo entre o feixe incidente e o feixe difratado de raios X, ambos inclinados de um ângulo θ do plano de difração. “ n ” é a ordem de interferência dos planos cristalinos. Uma representação destes fenômenos pode ser vista na Figura I.1^{5,6,80}.

$$n\lambda = 2d \text{sen}(\theta) \quad (\text{I.1})$$

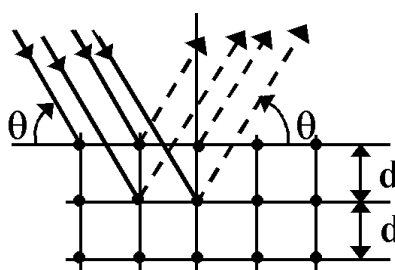


Figura I.1: Ângulos de interferência construtiva (θ) para uma dada família de planos de distância interplanar (d), obedecendo a lei de Bragg⁶.

O espaçamento interplanar é o mesmo para todas as famílias de planos quando o material se apresenta livre de tensões (Figura I.2).

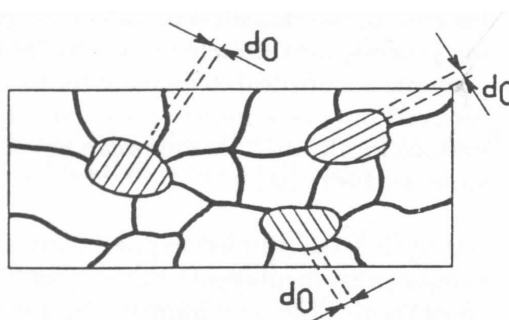


Figura I.2: Representação da distância interplanar para um material policristalino livre de tensões residuais⁶.

Porém, na presença de tensões residuais o espaçamento interplanar (d) difere do espaçamento de amostras livres de tensões (Figura I.3)^{6,81}.

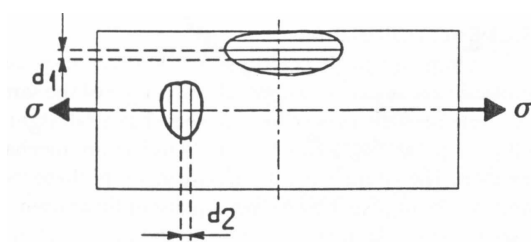


Figura I.3: Representação das distâncias interplanares para um material policristalino contendo tensões residuais⁶.

O método de difração de raios X utiliza uma família de planos particular como referência para determinar a relação entre as deformações medidas em várias direções e o estado de tensões residuais presente na região^{77,78}.

Para a medida da deformação, a amostra é posicionada no difratômetro e é exposta ao feixe de raios X. A Figura I.4 faz uma demonstração desta geometria onde a distância interplanar é medida para uma dada direção definida pela posição angular dada pelos ângulos ϕ (no plano xy) e ψ (no plano xz).

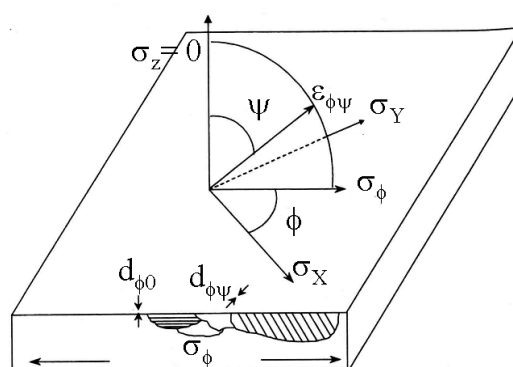


Figura I.4: Situação de tensão plana mostrando a variação do retículo cristalino para um dado ângulo ψ ⁷⁷.

A interação entre o feixe e a distância interplanar, d , causa padrões de difração característicos para cada material. As deformações induzidas pelas tensões residuais causam mudanças na posição dos picos do padrão de difração. Através da medida precisa da mudança de posição, a mudança na distância interplanar ($d_{\phi\psi}$) pode ser calculada tornando possível à dedução da deformação no material (Equação I.2)⁷⁶:

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

Neste caso, é preciso conhecer a distância interplanar para o material livre de tensões (d_0).

Utilizando-se a lei de Hooke e assumindo a condição plana de tensão na superfície, temos que a deformação no retículo cristalino, medida numa dada direção descrita pelos ângulos ϕ e ψ , pode ser definida pela Equação I.3:

$$d_{\phi\psi} = \left[\left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \text{sen}^2 \psi \right] - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0 (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + d_0 \right] \quad (\text{I.3})$$

Onde $d_{\phi\psi}$ é representa, d , na direção (ϕ, ψ) , ϕ é o ângulo entre a componente na direção x no plano da superfície e a direção da medida, ψ é o ângulo entre a direção normal à superfície e a direção da medida. Esta Equação I.3 é a relação fundamental entre o espaçamento interplanar e o estado biaxial de tensões residuais na superfície de uma amostra cristalina para o método de difração de raios X^{5,6,25,80}.

Plotando-se d contra $\text{sen}^2 \psi$, nota-se que o intercepto desta curva segue a Equação I.4:

$$d_{\phi\psi} = - \left[\left(\frac{\nu}{E} \right)_{(hkl)} d_0 (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) + d_0 \right] \quad (\text{I.4})$$

O coeficiente angular da curva é dado pela Equação I.5:

$$\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \text{sen}^2 \psi} = \left(\frac{1+\nu}{E} \right)_{(hkl)} \sigma_{\phi} d_0 \quad (\text{I.5})$$

A qual pode ser solucionada para σ_{ϕ} (Equação I.6):

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1+\nu} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_0} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \text{sen}^2 \psi} \right) \quad (\text{I.6})$$

Como $E \gg \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, o valor de $d_{\phi 0}$ difere de d_0 em não mais do que 1%, deste modo, a Equação 8.6 adota a forma dada pela Equação I.7:

$$\sigma_{\phi} = \left(\frac{E}{1+\nu} \right)_{(hkl)} \frac{1}{d_{\phi 0}} \left(\frac{\partial d_{\phi\psi}}{\partial \text{sen}^2 \psi} \right) \quad (\text{I.7})$$

A Equação I.7 torna a determinação das tensões residuais por difração de raios X um método diferencial onde nenhuma amostra livre de tensões residuais é necessária para determinar o estado biaxial de tensões residuais na superfície da amostra^{5,6,25,76}.

A partir das equações descritas anteriormente, três métodos podem ser derivados para a determinação das tensões residuais através do Método de Difração de raios X:

O primeiro deles é o Método do Ângulo Único, o qual utiliza um único ângulo de incidência da radiação, medindo-se a difração em detectores posicionados em duas direções ψ diferentes. Este método é pouco sensível e raramente utilizado para aplicações práticas.

O Método dos Dois Ângulos utiliza dois ângulos ψ (geralmente 0° e 45°), sendo este mais utilizado nos Estados Unidos. A relação entre o ângulo ψ e o ângulo de incidência do feixe pode ser descrita pela Equação I.8, onde ϖ é o ângulo entre o feixe incidente e a direção normal à superfície⁷⁷.

$$\psi = \varpi + \theta - \frac{\pi}{2} \quad (\text{I.8})$$

O Método do $\text{sen}^2\psi$ é o método mais utilizado na União Européia e no Japão. Este método é similar ao método dos dois ângulos, porém utiliza vários ângulos ψ , sendo considerado estatisticamente mais preciso^{25,81,82}.

I.2 Características da Medida das Tensões Residuais por Difração de raios X

I.2.1 Características dos Picos de Difração

O pico de difração resulta da contribuição simultânea de um grande número de domínios coerentes de difração, como pode ser visto na Figura I.5:

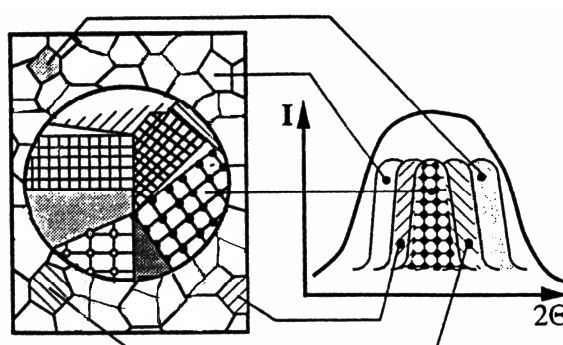


Figura I.5: Visão física do pico de difração de raios X para materiais policristalinos⁶.

A partir desta figura, percebe-se que diferentes planos cristalográficos variam no seus mecanismos de deformação e fornecem diferentes respostas para as deformações elásticas no retículo cristalino^{76,77}. Visto que, a difração dos raios X em um material cristalino permite a detecção de um espectro contínuo de radiação branca e três linhas monocromáticas de alta

intensidade, as linhas $K\alpha_1$ (decorrente da transição eletrônica do subnível L_{III} para o nível K), $K\alpha_2$ (decorrente da transição eletrônica do subnível L_{II} para o nível K) e $K\beta$ (decorrente da transição eletrônica do nível M para o nível K). As linhas $K\alpha_1$ e $K\alpha_2$ diferem muito pouco em comprimentos de onda para permitir a separação dos picos de difração produzidos. A linha $K\beta$ é produzida a comprimentos de ondas substancialmente menores, podendo ser separada por filtragem das linhas $K\alpha$. Porém a intensidade da linha $K\beta$ é muito fraca para as medidas práticas por difração de raios X e assim somente as linhas $K\alpha_1$ e $K\alpha_2$ são utilizadas para a análise das tensões residuais por difração de raios X^{5,6,25,76,77}. Devido ao fato de que o dublete $K\alpha$ é normalmente utilizado para medidas por difração de raios X os picos de difração consistem na superposição dos dois picos (Figura I.6, onde A corresponde ao pico de difração de um material completamente recozido, B e C correspondem aos picos de difração de materiais parcialmente endurecidos e D ao pico de difração de um material completamente endurecido) dando indícios de que, quanto maior for o gradiente de tensões residuais menos resolvidos serão os picos característicos de difração.

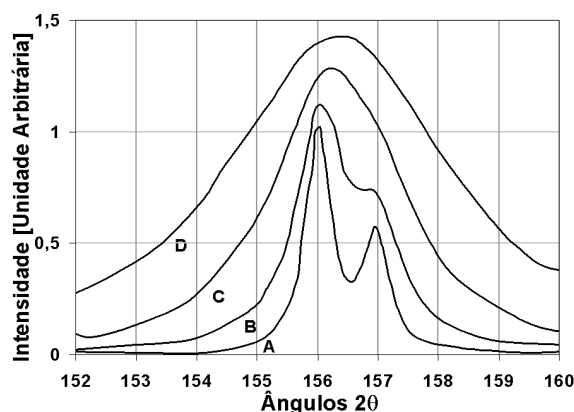


Figura I.6: Variação para o dublete $K\alpha$ para um aço simulado (hkl igual a 211) utilizando a radiação $CrK\alpha$ e o pico com 2θ a 156° ⁷⁷.

I.2.2 Escolha das Constantes Elásticas do Material

Devido à anisotropia elástica dos materiais policristalinos as constantes elásticas nas direções, hkl , específicas (constantes elásticas de difração de raios X) podem variar em até 40% dos valores encontrados na literatura para as constantes elásticas do material e, deste modo, estas devem ser utilizadas preferencialmente.

I.2.3 Ângulo de Difração (Ângulo de Bragg)

As mudanças na distância interplanar, d , são em geral muito pequenas e podem ser descritas pela Equação I.9:

$$\frac{\Delta d}{d} = \Delta \theta * \cot \theta \quad (\text{I.9})$$

A partir disto, é preciso escolher um comprimento de onda dos raios X que possa ser utilizado no mais alto ângulo de Bragg possível^{5,6,76,77}. Em geral utilizam-se ângulos 2θ altos ($130^\circ < 2\theta < 165^\circ$) para aumentar a sensibilidade do método em função das variações das distâncias interplanares^{5,6,25,76,77}.

A radiação deve ser escolhida de modo a evitar ou minimizar a fluorescência da amostra, ou seja, a emissão de raios X pela amostra a ser analisada, pois esta reduz a resolução dos picos de difração^{5,6,76,77}.

A medida das tensões residuais por difração de raios X é considerada uma técnica não destrutiva quando restrita a análise superficial. Contudo, freqüentemente as análises sub-superficiais se fazem necessárias⁵.

I.3 Análise da variação das Tensões Residuais com a Profundidade

Medidas das tensões residuais variando com a profundidade por difração de raios X requerem a remoção de material da superfície. Visto que qualquer método mecânico de remoção, não importando quão delicado seja, irá deformar a superfície e introduzir tensões residuais adicionais, o polimento eletroquímico é preferido para a remoção de material. Porém a remoção de material da superfície causa um relaxamento das tensões residuais presentes no componente, tornando necessário a utilização de algum sistema de correção das tensões residuais^{25,82}.

Pode ser provado que, para uma chapa plana (Figura I.7, a seguir) a solução geral de Sikarskie⁸³ para remoção unilateral, baseada na solução desenvolvida por Moore e Evans⁸² (Equação I.10) poder ser utilizada:

$$\sigma_c(Z_1) = \sigma_d(Z_1) + 2 \int_{Z_1}^{Z_0} \frac{\sigma_d(Z)}{Z} dZ - 6Z_1 \int_{Z_1}^{Z_0} \frac{\sigma_d(Z)}{Z^2} dZ \quad (\text{I.10})$$

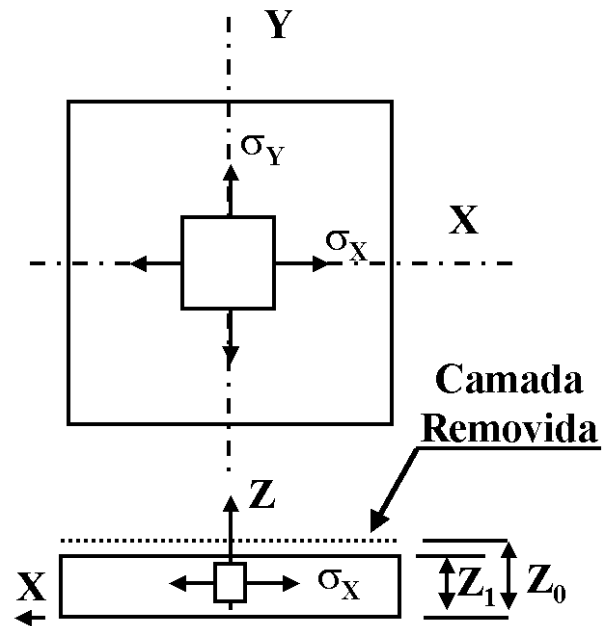


Figura I.7: Tensões em uma chapa plana após a remoção de uma camada da superfície.

Expandindo-se as integrações da Equação 8.10 em séries de Taylor e utilizando pequenos incrementos de remoção, esta toma a forma da Equação I.11, onde Z_0 é a espessura da peça antes da remoção de material, Z_1 é a espessura da peça após a remoção de material, σ_d é a tensão residual determinada e σ_c a tensão residual corrigida⁵.

$$\sigma_c(Z_1) = \sigma_d(Z_1) + \left(-4\sigma_d(Z_0) \left(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_0} \right) \right) \quad (\text{I.11})$$

Para remoções em pequenas profundidades, os valores corrigidos variam muito pouco em relação aos valores determinados e comumente estes últimos são utilizados⁸⁴.

ANEXO II

As distribuições das deformações medidas através do Método do Furo Cego para as amostras analisadas neste trabalho estão dispostas nas figuras a seguir:

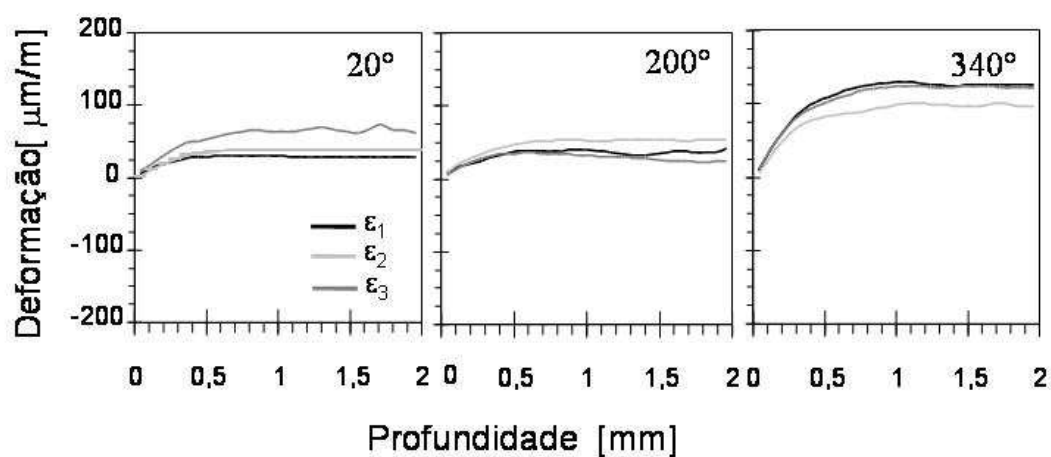


Figura II.1: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Conformado.

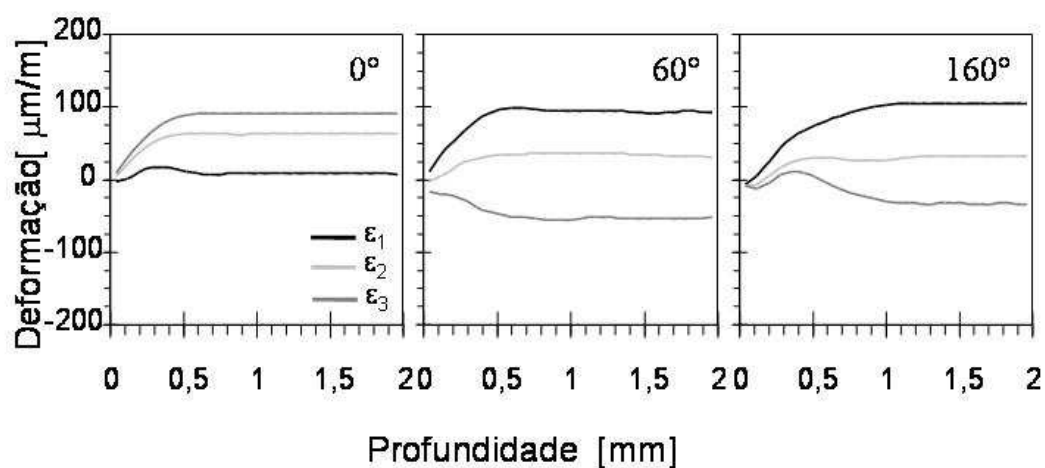


Figura II.2: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Usinado B.

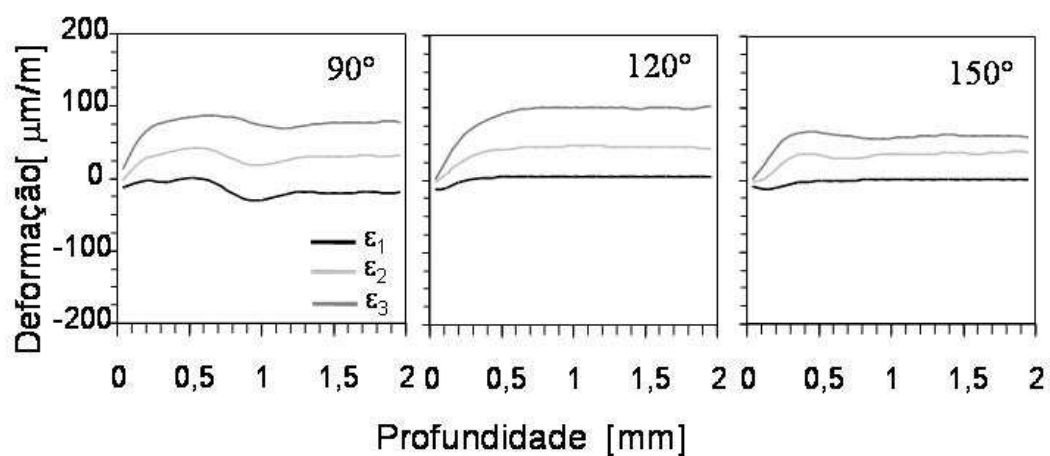


Figura II.3: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Usinado B.

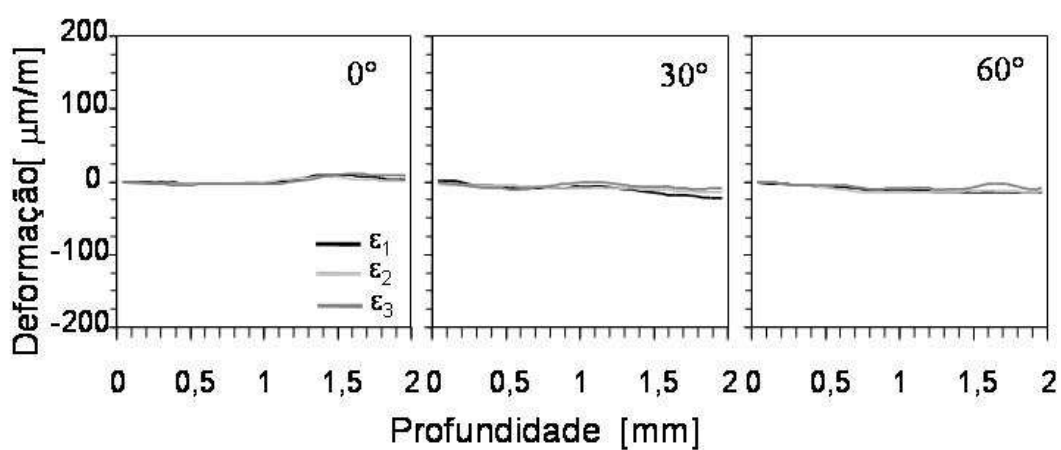


Figura II.4: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Recozido.

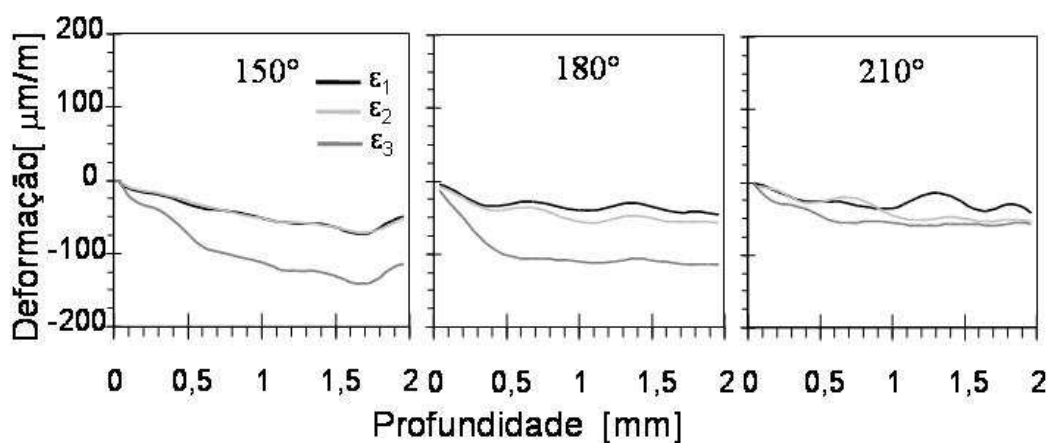


Figura II.5: Deformações medidas através do Método do Furo Cego para o anel Temperado.

ANEXO III

As distribuições dos sinais medidos através do Método Micromagnético com os filtros de frequência de análise de 0,4 MHz, 50 kHz, 2kHz e 0,5 kHz, para as amostras analisadas neste trabalho estão dispostas nas figuras a seguir:

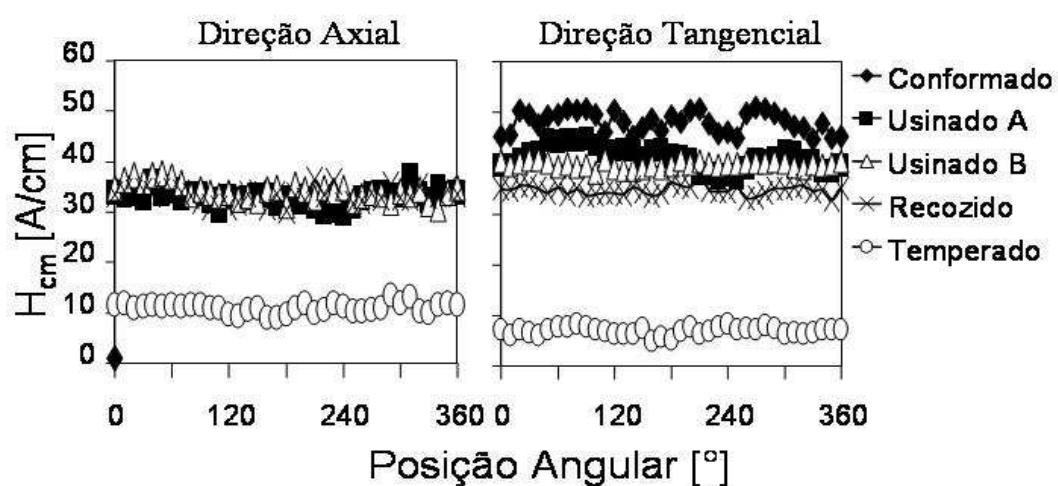


Figura III.1: Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 0,4 MHz.

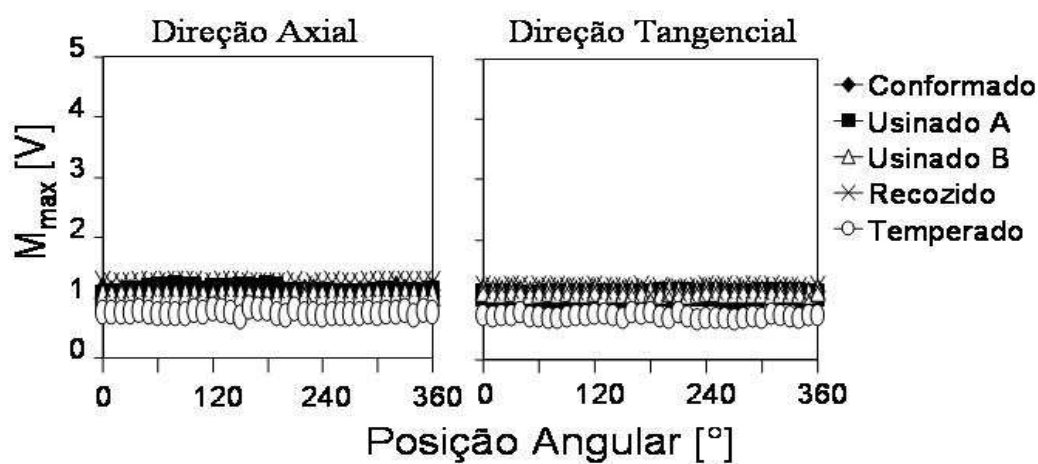


Figura III.2: Resultados das medidas de M_{max} , para o filtro de 0,4 MHz.

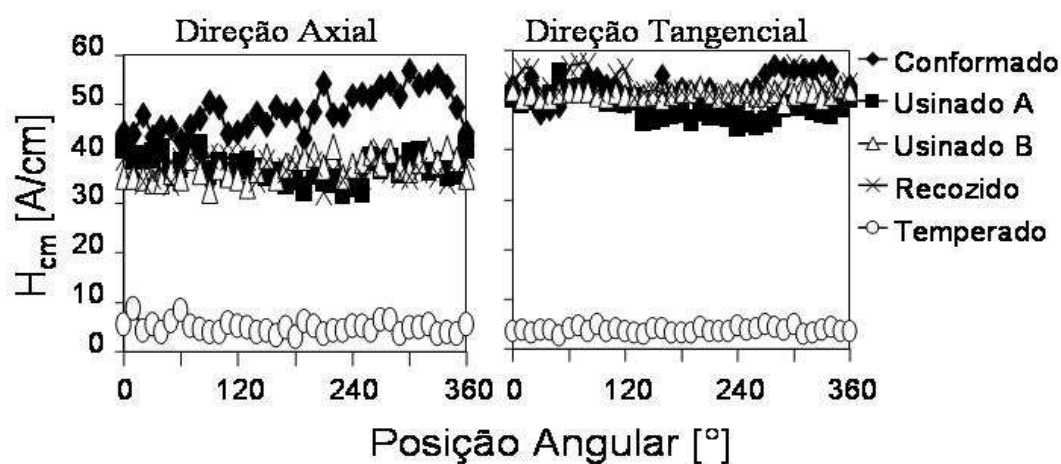


Figura III.3: Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 50 kHz.

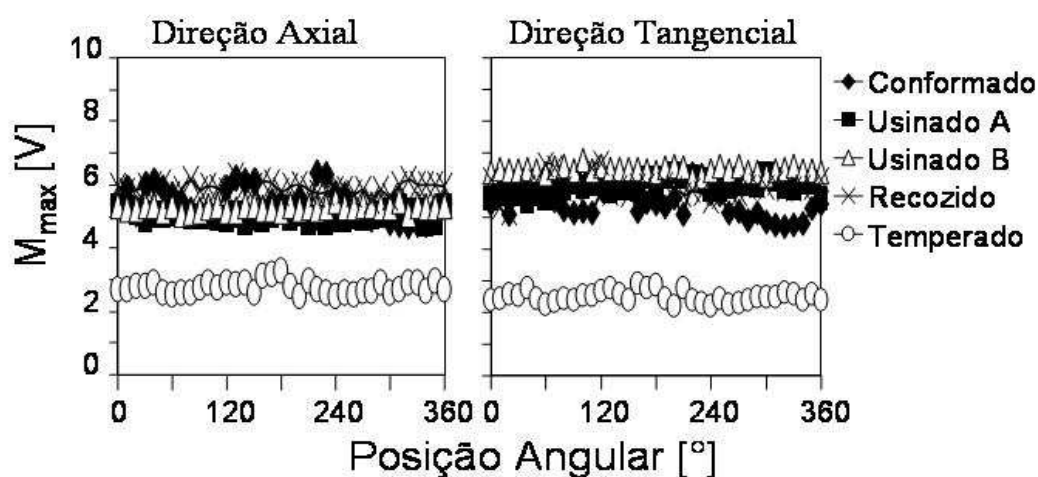


Figura III.4: Resultados das medidas de M_{max} , para o filtro de 50 kHz.

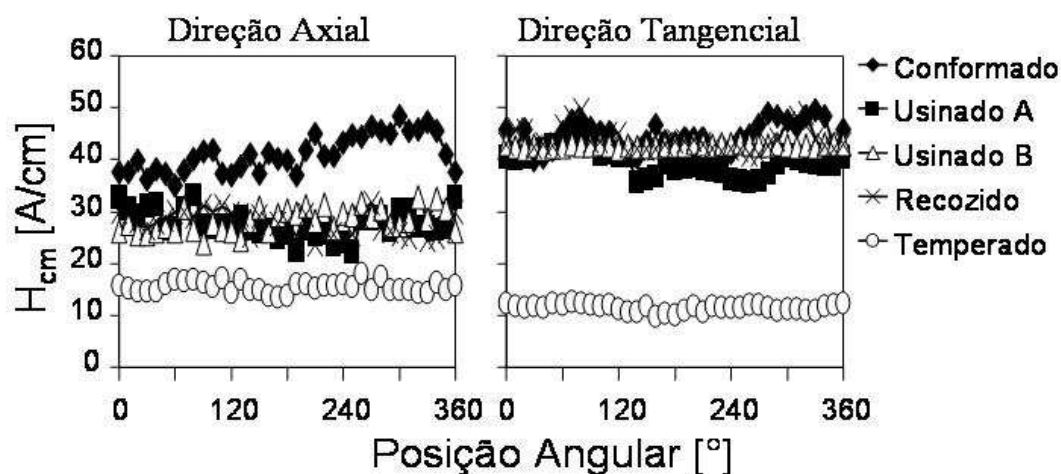


Figura III.5: Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 2 kHz.

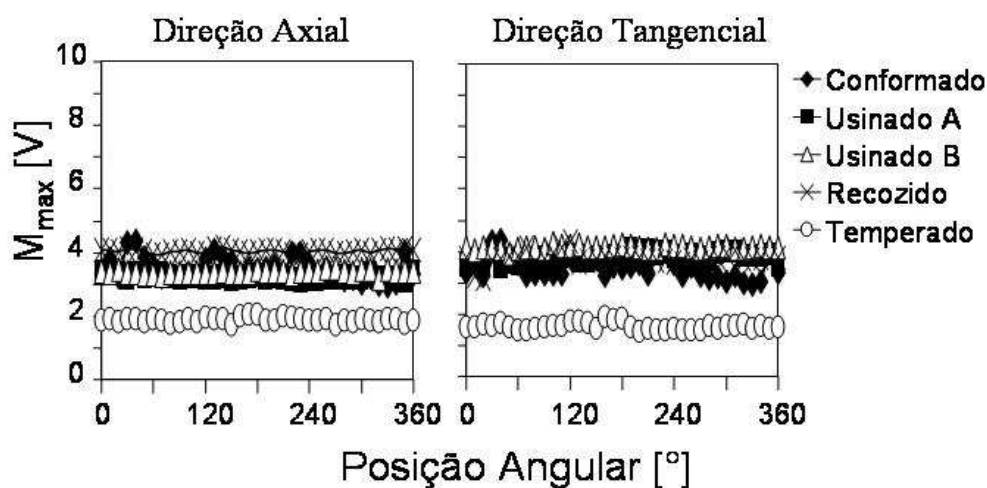


Figura III.6: Resultados das medidas de M_{\max} , para o filtro de 2 kHz.

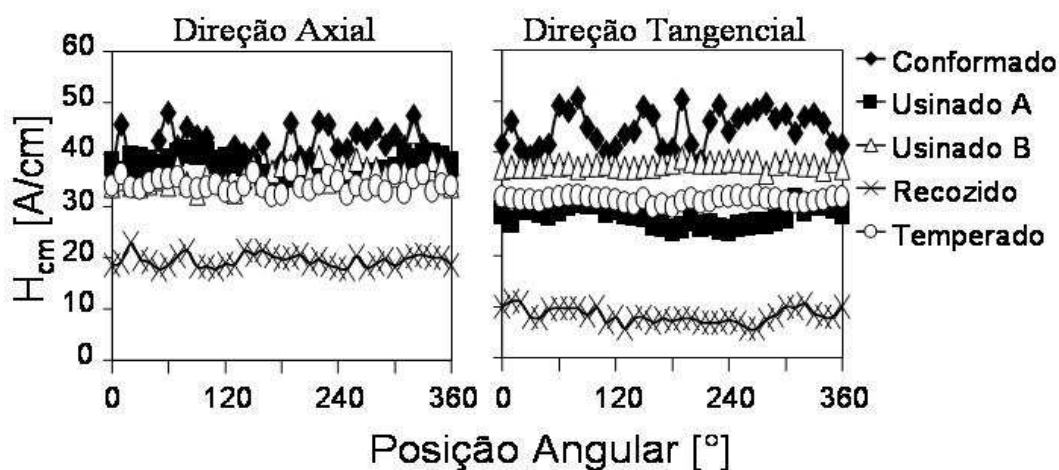


Figura III.7: : Resultados das medidas de H_{cm} , para o filtro de 0,5 kHz.

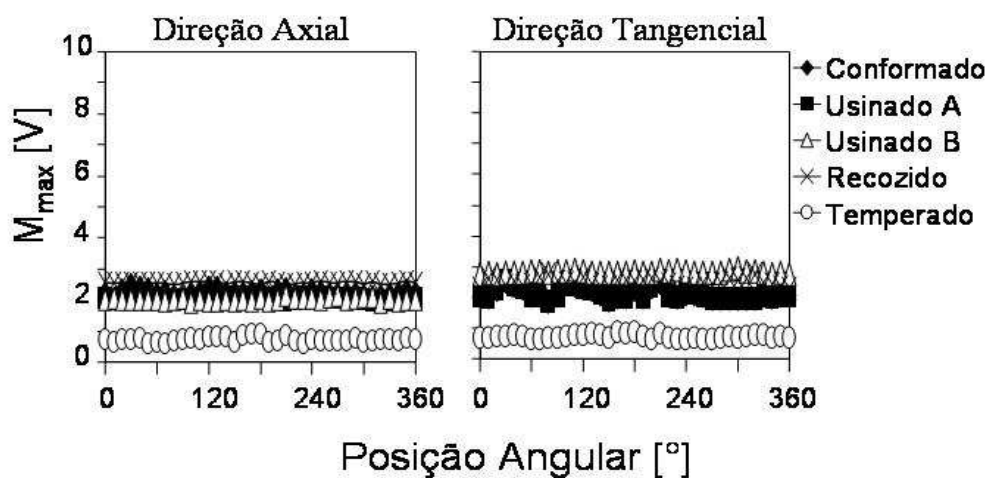


Figura III.8: : Resultados das medidas de M_{\max} , para o filtro de 0,5 kHz.

ANEXO IV

Tabela IV.1: Valores para as constantes de calibração do Método Micromagnético em função da frequência de análise e do estado do material.

Anel	Filtro de Frequência	x_1	x_2	x_3	R^2
Conformado	10 MHz	-22,07	12,11	-609,72	0,874
	0,4 MHz	-145,51	25,20	-1227,56	0,985
	50 kHz	134,55	-9,05	-417,88	1,000
	2 kHz	67,77	-1,97	-189,00	0,976
	0,5 kHz	280,85	1,67	-707,92	1,000
Anel	Filtro de Frequência	x_1	x_2	x_3	R^2
Usinados	10 MHz	-261,36	-22,75	2091,00	0,951
	0,4 MHz	10,18	-0,42	-72,97	0,991
	50 kHz	-90,64	1,28	309,90	0,890
	2 kHz	-73,88	-0,21	245,15	0,856
	0,5 kHz	-171,69	2,63	252,71	0,743
Anel	Filtro de Frequência	x_1	x_2	x_3	R^2
Recozido	10 MHz	12,31	0,88	-36,74	0,417
	0,4 MHz	-682,20	-2,90	933,05	0,621
	50 kHz	-4,36	-5,45	248,72	0,996
	2 kHz	-50,84	-3,70	318,20	1,000
	0,5 kHz	-236,67	-22,64	1021,16	0,830
Anel	Filtro de Frequência	x_1	x_2	x_3	R^2
Temperado	10 MHz	-72,60	-4,94	-207,20	0,524
	0,4 MHz	-351,53	-5,58	-379,25	0,585
	50 kHz	-209,94	-43,86	768,03	0,999
	2 kHz	4,71	39,86	-403,37	0,973
	0,5 kHz	-210,92	-24,06	964,65	0,935

ANEXO V

Tabela V.1: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Conformado na direção axial.

Tensão Residual na Direção Axial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	-9,01	-53,10	-170,50	-253,88	-225,06
10	6,90	-83,08	-82,92	-233,63	-148,26
20	-8,86	-59,91	-60,73	-109,14	-130,94
30	1,89	-42,69	-39,01	-112,34	-123,94
40	0,69	-41,08	-30,72	-176,20	-77,82
50	-2,70	-79,19	-64,05	-129,66	-166,55
60	3,68	-35,26	-123,52	-107,48	-171,29
70	5,51	-65,34	-151,15	-96,10	-125,20
80	-10,50	-61,72	-211,82	-95,11	-163,78
90	-6,47	-56,91	-216,90	-90,38	-141,77
100	-12,69	-54,95	-199,65	-121,25	-129,24
110	-9,04	-56,50	-205,46	-216,40	-160,36
120	3,60	-14,02	-73,72	-94,83	-89,20
130	-11,25	-63,40	-38,70	-161,08	-206,35
140	10,00	-76,36	-39,57	-248,52	-188,46
150	-9,39	-89,05	-53,76	-194,49	-188,38
160	-14,34	-62,88	-219,00	-145,62	-115,58
170	-13,92	-36,17	-143,70	-215,84	-161,94
180	-15,57	-39,05	-164,17	-138,47	-169,95
190	8,46	-39,25	-170,48	-167,10	-114,49
200	16,37	-30,59	-134,44	-89,59	-119,55
210	-5,07	-53,73	-210,28	-90,31	-96,60
220	-6,28	-65,44	1,21	-185,79	-97,50
230	-3,90	-68,03	-10,67	-229,99	-128,45
240	9,77	-26,24	-85,02	-220,22	-143,20
250	13,52	-57,81	-125,59	-247,94	-152,51
260	5,67	-37,91	-203,05	-108,05	-86,97
270	6,94	-63,05	-222,89	-80,41	-77,05
280	10,69	-72,81	-273,98	-96,54	-122,47
290	14,46	-68,62	-236,52	-118,83	-101,36
300	15,51	-76,21	-273,55	-154,73	-163,30
310	1,93	-62,50	-285,57	-188,98	-122,83
320	-4,50	-82,98	-292,48	-210,34	-201,03
330	1,50	-86,16	-291,82	-266,01	-211,26
340	-18,39	-79,43	-279,28	-168,41	-176,46
350	-7,55	-65,46	-161,90	-249,39	-210,32
360	-9,01	-53,10	-170,50	-253,88	-225,06
Média	-1,12	-58,38	-154,48	-163,97	-146,88
Desvio Padrão	9,75	18,03	88,03	60,18	41,90

Tabela V.2: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Conformado na direção tangencial.

Tensão Residual na Direção Tangencial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	-9,01	-53,10	-170,50	-253,88	-207,85
10	6,90	-83,08	-82,92	-233,63	-153,56
20	-8,86	-59,91	-195,28	-109,14	-135,31
30	1,89	-42,69	-173,56	-112,34	-124,60
40	0,69	-41,08	-165,27	-176,20	-75,52
50	-2,70	-79,19	-64,05	-129,66	-160,97
60	3,68	-35,26	-123,52	-107,48	-162,42
70	5,51	-65,34	-151,15	-96,10	-113,15
80	-10,50	-61,72	-211,82	-95,11	-153,06
90	-6,47	-56,91	-216,90	-90,38	-127,56
100	-12,69	-54,95	-199,65	-121,25	-119,26
110	-9,04	-56,50	-205,46	-216,40	-151,58
120	3,60	-14,02	-73,72	-94,83	-80,02
130	-11,25	-63,40	-173,25	-161,08	-188,61
140	10,00	-76,36	-174,12	-248,52	-176,59
150	-9,39	-89,05	-188,31	-194,49	-172,05
160	-14,34	-62,88	-219,00	-145,62	-109,05
170	-13,92	-36,17	-143,70	-215,84	-145,74
180	-15,57	-39,05	-164,17	-138,47	-152,78
190	8,46	-39,25	-170,48	-167,10	-106,76
200	16,37	-30,59	-134,44	-99,77	-108,96
210	-5,07	-53,73	-210,28	-90,31	-84,33
220	-6,28	-65,44	-133,34	-185,79	-92,29
230	-3,90	-68,03	-10,67	-229,99	-114,90
240	9,77	-26,24	-85,02	-220,22	-127,75
250	13,52	-57,81	-125,59	-247,94	-141,83
260	5,67	-37,91	-203,05	-108,05	-76,27
270	6,94	-63,05	-222,89	-80,41	-72,37
280	10,69	-72,81	-273,98	-96,54	-115,10
290	14,46	-68,62	-236,52	-118,83	-94,25
300	15,51	-76,21	-273,55	-154,73	-150,06
310	1,93	-62,50	-285,57	-188,98	-102,49
320	-4,50	-82,98	-292,48	-210,34	-191,76
330	1,50	-86,16	-291,82	-266,01	-201,64
340	-18,39	-79,43	-279,28	-168,41	-160,61
350	-7,55	-65,46	-161,90	-249,39	-196,73
360	-9,01	-53,10	-170,50	-253,88	-207,85
Média	-1,12	-58,38	-179,94	-164,25	-136,64
Desvio Padrão	9,75	18,03	66,89	59,86	39,66

TabelaV.3: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado A na direção axial.

Tensão Residual na Direção Axial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	4,39	-8,97	-116,65	-48,81	691,65
10	4,88	-6,25	-112,81	-48,63	634,98
20	2,12	-4,93	-104,70	-48,41	641,97
30	5,34	5,87	-81,25	-48,48	672,11
40	5,27	-5,11	-96,02	-46,96	594,60
50	3,98	3,00	-100,54	-47,68	658,94
60	9,59	-0,47	-103,32	-47,24	700,98
70	18,99	-4,66	-99,95	-47,77	642,12
80	15,63	-0,44	-87,45	-47,15	609,84
90	16,19	6,67	-94,83	-47,49	627,29
100	18,09	3,07	-91,07	-47,94	699,44
110	0,83	1,01	-92,62	-49,23	828,78
120	-4,83	6,51	-82,14	-47,88	657,77
130	-3,64	4,75	-95,80	-48,19	709,13
140	4,29	3,29	-81,68	-48,44	802,74
150	-10,39	7,99	-89,31	-47,70	640,39
160	-14,92	5,64	-86,04	-47,66	637,17
170	-12,54	1,39	-101,09	-48,56	775,62
180	-15,34	-2,01	-119,46	-47,75	672,57
190	-5,62	5,28	-93,99	-48,14	744,79
200	6,68	2,81	-106,40	-48,98	669,05
210	9,91	3,66	-82,12	-49,28	740,52
220	5,18	7,61	-91,74	-49,71	773,25
230	-17,35	12,92	-85,56	-49,77	782,44
240	-19,54	8,84	-90,09	-49,89	746,46
250	-10,04	8,90	-89,09	-49,65	667,09
260	-4,65	5,79	-92,50	-49,06	634,26
270	-6,37	4,37	-86,41	-48,55	614,48
280	-7,37	2,83	-91,85	-48,35	587,21
290	-1,93	3,75	-100,43	-48,52	647,47
300	7,44	4,12	-103,88	-48,52	684,56
310	23,98	-4,45	-116,78	-46,64	575,27
320	24,70	4,49	-109,06	-48,27	724,26
330	19,20	3,45	-106,64	-48,98	682,86
340	22,42	7,84	-77,29	-47,74	666,32
350	11,47	12,38	-80,17	-48,52	688,36
360	4,39	-8,97	-116,65	-48,00	662,38
Média	2,98	2,76	-96,15	-48,34	680,79
Desvio Padrão	12,04	5,42	11,52	0,79	60,97

Tabela V.4: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado A na direção tangencial.

Tensão Residual na Direção Tangencial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	-23,32	-26,48	-129,03	-45,41	545,11
10	-15,62	-31,90	-142,65	-45,66	515,43
20	-21,82	-33,75	-143,16	-45,07	496,75
30	-30,62	-25,63	-142,70	-44,67	501,44
40	-29,32	-22,66	-119,76	-44,56	590,52
50	-28,20	-31,52	-136,73	-43,86	614,22
60	-21,90	-28,44	-128,74	-43,87	628,65
70	-20,74	-38,12	-161,17	-43,41	656,86
80	15,39	-34,74	-157,50	-43,46	643,61
90	-15,99	-44,85	-174,64	-43,47	689,76
100	-18,21	-36,80	-162,42	-43,79	678,70
110	-23,80	-44,72	-171,69	-44,82	616,62
120	-29,45	-45,47	-176,53	-44,37	635,63
130	-19,67	-37,94	-149,45	-44,24	564,59
140	-33,04	-36,12	-165,48	-44,35	523,96
150	0,70	-42,32	-162,27	-45,02	567,69
160	-20,32	-37,23	-157,13	-44,46	605,04
170	-24,46	-46,79	-191,14	-44,09	605,29
180	-26,22	-47,43	-163,80	-44,74	651,04
190	-18,91	-62,27	-194,25	-44,49	639,01
200	-26,02	-54,20	-202,91	-45,01	655,63
210	-23,99	-60,02	-192,82	-45,84	672,79
220	-25,97	-51,06	-198,10	-45,94	602,63
230	-22,74	-57,39	-190,30	-46,50	605,78
240	-41,41	-41,85	-163,46	-46,33	546,88
250	-24,53	-44,30	-161,01	-46,45	530,83
260	-23,43	-47,96	-169,40	-45,81	509,05
270	-14,16	-43,74	-178,73	-45,09	508,62
280	-15,51	-38,83	-174,50	-45,11	521,13
290	-8,01	-54,51	-170,86	-44,82	565,31
300	-6,88	-58,75	-202,98	-44,01	603,34
310	-4,08	-56,43	-185,71	-44,23	606,98
320	-3,01	-44,94	-164,64	-44,99	633,59
330	-19,50	-47,26	-162,12	-45,02	635,47
340	-8,72	-46,02	-178,87	-45,77	607,99
350	-21,06	-51,50	-179,78	-45,85	552,41
360	-23,32	-26,48	-129,03	-45,41	545,11
Média	-19,40	-42,71	-165,82	-44,86	591,17
Desvio Padrão	10,49	10,36	21,72	0,85	55,24

Tabela V.5: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado B na direção axial.

Tensão Residual na Direção Axial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	-1,74	-13,83	-128,35	-47,58	590,49
10	-6,97	-9,99	-118,12	-46,76	608,20
20	-1,05	-14,55	-119,13	-46,21	556,62
30	-4,30	-9,98	-133,15	-46,70	557,70
40	-1,98	-10,13	-133,15	-46,28	557,16
50	-2,52	-4,06	-112,81	-46,28	560,58
60	-4,41	-4,06	-132,03	-46,30	520,66
70	15,31	-4,42	-101,39	-47,07	589,98
80	-2,91	-9,86	-109,93	-47,99	618,30
90	-11,77	-6,70	-116,83	-47,61	600,31
100	14,22	-8,47	-121,47	-47,77	593,50
110	-3,00	-7,97	-129,86	-48,04	599,11
120	2,83	-9,23	-113,30	-47,75	578,83
130	4,40	-8,88	-117,57	-48,35	595,52
140	1,38	-12,01	-128,25	-47,97	609,86
150	11,46	-10,15	-123,15	-48,36	617,51
160	-3,43	-10,39	-120,68	-47,57	606,80
170	9,64	-11,18	-117,52	-47,42	536,97
180	2,09	-16,86	-112,24	-49,00	633,49
190	12,08	-14,21	-123,53	-47,37	620,21
200	7,78	-11,97	-115,23	-47,71	617,35
210	-16,93	-13,15	-122,17	-48,33	565,04
220	5,16	-7,06	-113,14	-47,37	558,48
230	-7,50	-12,42	-123,82	-47,42	536,53
240	-3,21	-14,53	-140,00	-47,39	570,71
250	4,84	-13,56	-120,69	-48,49	649,51
260	-1,54	-20,11	-116,30	-48,30	511,45
270	-13,55	-18,98	-128,19	-47,80	514,52
280	6,81	-11,86	-122,29	-48,05	576,76
290	-4,34	-10,79	-121,03	-48,80	519,14
300	-14,95	-14,80	-123,84	-47,78	482,65
310	-14,68	-15,55	-138,43	-47,98	509,62
320	43,15	4,94	-96,42	-47,54	563,87
330	-0,07	-15,03	-125,50	-48,85	624,18
340	15,78	-13,20	-117,92	-49,18	575,56
350	5,71	-14,11	-121,20	-48,03	619,64
360	-1,74	-13,83	-128,35	-47,58	590,49
Média	1,08	-11,16	-121,27	-47,70	576,68
Desvio Padrão	11,01	4,62	9,00	0,75	40,14

Tabela V.6: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Usinado B na direção tangencial.

Tensão Residual na Direção Tangencial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	-4,97	-68,87	-204,21	-44,11	492,74
10	-9,52	-60,33	-213,29	-44,71	468,66
20	-2,97	-69,12	-209,86	-44,50	510,50
30	-11,31	-66,57	-209,23	-44,09	470,65
40	-7,54	-65,11	-214,77	-44,25	457,70
50	-7,30	-55,86	-207,90	-44,68	456,65
60	-18,95	-63,41	-197,68	-44,94	467,69
70	-13,01	-67,34	-218,81	-44,54	471,99
80	-12,74	-66,56	-221,68	-44,96	491,30
90	-17,67	-64,66	-211,59	-44,65	500,45
100	-14,49	-77,10	-240,18	-45,40	469,79
110	-22,65	-71,02	-209,92	-44,32	457,94
120	-13,45	-71,34	-222,65	-44,87	470,44
130	-12,40	-74,85	-212,13	-45,32	478,75
140	-9,62	-67,69	-213,74	-45,09	480,00
150	-9,07	-68,14	-211,65	-45,18	510,93
160	-12,74	-67,57	-214,58	-44,81	511,13
170	-11,03	-72,76	-208,18	-45,11	491,89
180	-14,17	-73,80	-202,21	-44,81	502,25
190	-4,17	-73,52	-218,45	-44,49	490,56
200	-9,42	-68,88	-220,64	-44,46	470,76
210	-23,87	-65,15	-217,53	-44,39	477,04
220	-18,88	-63,47	-188,72	-44,75	470,92
230	-23,50	-74,17	-192,37	-44,74	467,17
240	-17,43	-70,76	-210,28	-44,40	473,67
250	-9,29	-70,98	-221,55	-44,56	486,42
260	-9,13	-69,16	-208,05	-44,44	493,78
270	-9,24	-63,32	-223,37	-44,59	465,67
280	-10,20	-66,71	-205,03	-44,51	472,42
290	-22,84	-70,90	-207,53	-44,51	449,68
300	-28,60	-72,48	-194,64	-44,61	452,68
310	-17,58	-64,45	-208,73	-45,08	478,51
320	-13,91	-64,07	-213,34	-45,00	462,85
330	-6,88	-67,12	-222,69	-44,68	478,78
340	-6,74	-70,15	-210,85	-44,78	488,47
350	-6,38	-68,86	-207,71	-44,87	473,67
360	-4,97	-68,87	-204,21	-44,11	492,74
Média	-12,66	-68,25	-211,35	-44,68	478,57
Desvio Padrão	6,22	4,28	9,65	0,33	16,25

Tabela V.7: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Recozido na direção axial.

Tensão Residual na Direção Axial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	2,56	0,40	8,93	-0,08	30,63
10	-12,32	3,58	18,07	7,15	27,80
20	-21,65	8,99	35,88	5,64	30,43
30	-23,76	10,00	29,16	4,89	25,20
40	-8,20	7,35	20,68	3,90	24,36
50	17,40	7,10	35,83	-1,15	31,50
60	-1,60	7,00	13,18	7,10	30,07
70	-42,10	7,97	7,37	3,70	29,35
80	-32,57	6,02	10,23	1,93	28,58
90	2,42	-1,48	7,21	1,75	26,64
100	0,26	0,40	8,93	7,35	24,27
110	12,52	1,05	9,81	20,21	24,61
120	-20,32	6,54	10,72	16,90	26,93
130	-5,94	-0,53	7,77	8,54	22,03
140	-10,58	12,86	32,83	-1,73	25,96
150	-39,34	4,50	14,27	-4,37	24,65
160	-30,08	12,35	21,73	29,06	15,07
170	-39,57	14,18	22,63	20,16	23,64
180	-16,62	11,03	18,19	18,23	23,71
190	-41,77	17,00	32,56	24,77	22,51
200	-16,95	2,22	15,32	18,18	26,32
210	4,66	26,08	47,49	-5,87	25,87
220	-18,49	19,17	25,71	42,77	22,57
230	1,28	22,95	34,32	12,39	26,87
240	17,15	20,31	36,94	13,85	25,08
250	3,65	15,85	29,61	4,91	26,91
260	-37,31	4,18	17,33	23,29	26,23
270	11,04	-1,06	1,77	6,54	29,03
280	-23,08	18,17	24,82	14,55	26,49
290	-37,08	17,88	28,95	-7,30	27,61
300	16,39	16,48	31,67	3,93	28,71
310	-35,41	24,18	22,02	4,28	29,38
320	-29,16	11,21	20,86	-2,34	30,68
330	-35,19	18,54	27,75	4,31	28,96
340	-31,50	19,84	34,61	-4,98	27,63
350	-23,89	12,10	28,53	-7,71	29,53
360	2,56	0,40	8,93	-0,08	30,63
Média	-14,66	10,40	21,69	7,96	26,66
Desvio Padrão	18,83	7,85	10,99	11,11	3,23

Tabela V.8: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Recozido na direção tangencial.

Tensão Residual na Direção Tangencial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	39,95	-34,91	-67,52	7,85	30,70
10	-6,17	-14,72	-47,55	21,85	33,85
20	-21,42	-10,32	-46,82	15,03	34,75
30	15,52	-26,08	-59,69	10,26	34,19
40	-3,00	-32,05	-65,95	11,83	35,27
50	55,27	-34,88	-59,35	18,53	34,23
60	32,01	-48,29	-88,66	13,92	33,62
70	-39,73	-68,17	-90,95	25,41	34,94
80	-40,15	-47,76	-92,31	12,67	33,74
90	13,30	-32,99	-62,90	19,58	30,13
100	29,60	-43,13	-64,26	24,86	30,17
110	34,77	-57,49	-78,96	21,87	32,00
120	-6,60	-67,38	-86,11	12,79	30,96
130	27,20	-18,53	-55,35	18,65	30,10
140	7,17	-26,14	-61,79	24,14	30,79
150	3,73	-26,59	-62,70	25,68	26,51
160	-23,93	-33,69	-61,73	40,39	29,89
170	-43,83	-33,92	-60,02	14,15	28,50
180	-14,73	-32,22	-62,65	30,12	30,58
190	-41,30	-36,06	-64,10	25,10	31,84
200	-27,84	-35,90	-57,69	39,44	30,03
210	7,97	-28,84	-58,71	31,40	29,51
220	1,86	-24,76	-58,35	34,47	33,79
230	30,16	-23,79	-58,05	20,39	28,58
240	27,17	-23,97	-60,13	12,15	31,55
250	54,85	-19,93	-54,74	28,70	33,60
260	-14,59	-24,32	-50,35	18,76	33,88
270	41,81	-19,51	-49,18	20,39	32,30
280	5,79	-32,25	-61,80	11,48	31,61
290	-35,18	-35,64	-60,66	14,39	33,21
300	4,08	-54,99	-91,50	20,80	35,69
310	-38,72	-64,21	-80,21	-1,84	35,49
320	-40,52	-51,72	-87,10	13,84	33,35
330	-25,25	-33,95	-66,89	22,54	32,79
340	4,47	-30,90	-60,43	20,95	34,71
350	41,44	-28,40	-63,01	49,24	29,53
360	39,95	-34,91	-67,52	7,85	30,70
Média	2,57	-34,95	-65,56	20,53	32,08
Desvio Padrão	30,16	14,12	12,62	10,06	2,27

Tabela V.9: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Temperado na direção axial.

Tensão Residual na Direção Axial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	5,57	234,39	-30,65	53,51	86,98
10	-38,49	201,08	-162,87	51,64	84,79
20	6,23	178,37	-4,43	52,11	84,60
30	13,57	185,04	-45,50	55,81	97,42
40	-22,67	185,97	-14,40	40,63	80,64
50	-12,22	244,57	-42,07	57,77	98,73
60	-13,16	268,76	-121,73	62,54	100,51
70	-16,71	263,11	4,76	67,73	99,52
80	18,28	268,07	30,62	57,28	93,15
90	15,08	254,81	25,37	57,61	95,67
100	-2,93	216,22	-4,37	50,53	83,47
110	-8,03	285,83	-60,90	52,11	83,48
120	6,83	177,39	-59,90	47,75	80,77
130	13,11	271,93	-45,71	52,12	78,62
140	-16,48	198,73	-5,59	52,46	77,73
150	-46,19	199,42	45,30	80,65	88,31
160	-16,98	147,36	-17,45	41,48	84,48
170	7,24	137,20	-99,95	48,17	68,90
180	4,72	155,46	-47,15	42,13	85,57
190	-52,39	237,60	-91,69	61,30	96,29
200	19,67	241,52	26,25	65,23	97,31
210	-7,23	206,31	-3,54	44,82	80,33
220	2,09	234,76	30,57	69,56	100,64
230	-25,19	228,09	52,13	60,86	85,11
240	-20,84	244,00	26,75	70,57	96,19
250	49,49	217,60	6,67	67,90	97,83
260	11,97	322,24	67,67	67,75	95,73
270	27,84	193,03	-64,28	65,96	98,06
280	6,09	301,23	-62,52	63,59	98,67
290	16,44	190,32	6,69	41,98	95,50
300	-36,75	197,89	12,73	56,64	99,11
310	40,59	199,95	2,96	44,39	90,12
320	-28,96	168,01	-78,48	54,84	76,78
330	-57,11	167,61	6,65	47,67	65,90
340	35,65	256,00	41,48	70,42	87,05
350	-19,54	192,40	-4,15	44,80	68,23
360	5,57	234,39	-30,65	53,51	86,98
Média	-3,67	219,10	-19,23	56,10	88,36
Desvio Padrão	25,10	43,50	50,97	9,88	9,62

Tabela V.10: Resultados da análise das tensões residuais através do Método Micromagnético para o Anel Temperado na direção axial.

Tensão Residual na Direção Tangencial [MPa]					
Posição Angular [°]	Filtro de Frequência				
	0,5 kHz	2 kHz	50 kHz	0,4 MHz	10 MHz
	Profundidade de Pele estimada [mm]				
	1,00	0,50	0,10	0,05	0,01
0	73,32	96,57	119,63	84,64	107,60
10	75,30	72,72	103,84	96,55	109,67
20	76,25	61,19	92,10	85,01	99,94
30	74,38	66,59	84,87	81,36	103,04
40	67,56	62,33	30,59	73,94	93,08
50	69,10	90,28	139,49	91,60	107,31
60	79,77	77,90	117,94	87,99	111,27
70	69,66	98,59	76,55	91,28	112,33
80	67,55	89,21	108,60	93,38	105,00
90	69,29	84,01	58,38	84,59	107,54
100	65,78	70,65	84,98	84,98	101,21
110	64,33	83,33	70,91	82,80	101,89
120	62,87	48,87	65,96	78,31	92,54
130	70,02	25,03	52,56	75,05	92,46
140	83,33	22,32	103,77	85,93	97,08
150	79,04	67,82	94,88	98,47	115,16
160	78,24	-4,69	-15,81	75,94	84,42
170	71,28	8,53	51,22	77,55	89,97
180	80,84	1,44	29,70	77,19	93,46
190	89,55	33,72	118,44	91,98	108,36
200	83,92	70,49	115,32	99,21	114,17
210	67,31	27,82	39,97	72,23	95,81
220	85,89	72,22	119,48	94,53	112,78
230	78,93	60,27	142,80	100,65	115,14
240	77,12	57,44	110,09	95,49	115,62
250	65,98	57,13	105,02	99,19	112,37
260	86,45	76,20	134,38	100,18	116,76
270	74,96	76,34	75,48	105,29	118,83
280	83,19	53,82	89,28	94,50	115,31
290	67,83	32,77	90,45	85,67	110,50
300	91,30	42,73	44,14	99,43	110,12
310	89,12	49,13	121,52	80,48	108,11
320	80,39	33,36	86,53	86,85	101,96
330	74,19	34,36	78,22	90,02	102,72
340	81,44	64,18	80,43	97,19	115,11
350	59,82	80,46	79,52	82,79	108,90
360	73,32	96,57	119,63	84,64	107,60
Média	75,37	57,88	87,05	88,29	105,81
Desvio Padrão	8,05	26,95	34,45	8,76	8,69