



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO TECNOLÓGICO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

GABRIEL FRACALLOSSI FEIJO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS NA VARIAÇÃO
DO COMPORTAMENTO DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN
EM ARAMES UTILIZADOS EM DUTOS FLEXÍVEIS**

Vitória, ES
2024



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO TECNOLÓGICO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

GABRIEL FRACALOSI FEIJO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS NA VARIAÇÃO DO
COMPORTAMENTO DO RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN EM ARAMES
UTILIZADOS EM DUTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo

Coorientador: Prof. Dr. Juan Manuel Pardal

Vitória, ES
2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

F797a Fracalossi Feijó, Gabriel, 1993-
Análise da Influência das Tensões Residuais na Variação do
Comportamento do ruído Magnético de Barkhausen em Arames
Utilizados em Dutos Flexíveis / Gabriel Fracalossi Feijó. - 2024.
88 p.

Orientador: Marcelo Camargo Severo de Macêdo.

Coorientador: Juan Manuel Pardal.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Ruído Magnético de Barkhausen. 2. Tensões Residuais. 3.
Anisotropia cristalina. 4. Propriedades Magnéticas. I. Camargo
Severo de Macêdo, Marcelo. II. Manuel Pardal, Juan. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV.
Título.

CDU: 621

GABRIEL FRACALOSSO FEIJÓ

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS NA
VARIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO RUÍDO
MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN EM ARAMES UTILIZADOS
EM DUTOS FLEXÍVEIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal do Espírito Santo para
obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Grau:

BANCA EXAMINADORA

Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo
Orientador

Dr. Juan Manuel Pardal
Co-orientador

Dra. Olga Liskevych

Dr. Sérgio Souto Maior Tavares

Vitória, ES, 2024



Documentos defesa Gabriel Gracalossi

Data e Hora de Criação: 27/02/2024 às 17:30:55

Documentos que originaram esse envelope:

- Folha aprovaA-5A-Eo Gabriel Gracalossi Feijo.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)
- ATA 330 Gabriel Gracalossi Feijo.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)
- QuestionA-7rlo avaliaA-5A-Eo CAPES Gabriel Gracalossi Feijo.pdf (Arquivo PDF) - 1 página(s)



Hashs únicas referente à esse envelope de documentos

[SHA256]: 87f4619a3eff2230c3fd1e7b3f0a88364a2b44e27b39e3099a4c844ad139d57

[SHA512]: 5d87f1996a8ac79b851870b509ba8b40ba4c4afc3a3676258012379077ad1487a0e71826dcf720447cd78356399bcba7618088086ad316420t23a536816df963

Lista de assinaturas solicitadas e associadas à esse envelope



ASSINADO - Juan Manuel Pardal (juanmanuelpardal@yahoo.com.br)

Data/Hora: 28/02/2024 - 19:09:52, IP: 200.156.93.80, Geolocalização: [-22.905208, -43.131635]
[SHA256]: 2b45dbc872aa2b0087cecad5a3324106a0631bd7dfb872057bb7a6742f9b68a



ASSINADO - Marcelo Camargo Severo de Macedo (marcelo.macedo@ufes.br)

Data/Hora: 27/02/2024 - 17:49:41, IP: 179.105.110.61, Geolocalização: [-20.289945, -40.298086]
[SHA256]: 9a12691042f60727d3bb7e0412b1b1d53e65ad83294b242c09e60e7559f48a



ASSINADO - Olga Liskevych (olga.liskevych@ufes.br)

Data/Hora: 27/02/2024 - 19:01:06, IP: 187.36.166.215
[SHA256]: 6fa2feaf15d36d0d7c1bf61017f03603e759b3f9b17a3d1575e6a17fcc88e82



ASSINADO - Sérgio Souto Maior Tavares (ssmtavares@terra.com.br)

Data/Hora: 01/03/2024 - 17:45:41, IP: 200.156.93.80, Geolocalização: [-22.914069, -43.126249]
[SHA256]: a7488fbb94ba9a256f8d37659f156eb4e0467ac79e30651d01e6c3b000d1124f

Histórico de eventos registrados neste envelope

01/03/2024 17:45:41 - Envelope finalizado por ssmtavares@terra.com.br, IP 200.156.93.80
01/03/2024 17:45:41 - Assinatura realizada por ssmtavares@terra.com.br, IP 200.156.93.80
01/03/2024 17:45:21 - Envelope visualizado por ssmtavares@terra.com.br, IP 200.156.93.80
28/02/2024 19:09:52 - Assinatura realizada por juanmanuelpardal@yahoo.com.br, IP 200.156.93.80
28/02/2024 19:09:40 - Envelope visualizado por juanmanuelpardal@yahoo.com.br, IP 200.156.93.80
27/02/2024 19:01:06 - Assinatura realizada por olga.liskevych@ufes.br, IP 187.36.166.215
27/02/2024 17:49:41 - Assinatura realizada por marcelo.macedo@ufes.br, IP 179.105.110.61
27/02/2024 17:48:37 - Envelope visualizado por marcelo.macedo@ufes.br, IP 179.105.110.61
27/02/2024 17:35:08 - Envelope registrado na Blockchain por andreia.eyng@ufes.br, IP 200.137.65.106
27/02/2024 17:35:07 - Envelope encaminhado para assinaturas por andreia.eyng@ufes.br, IP 200.137.65.106
27/02/2024 17:30:57 - Envelope criado por andreia.eyng@ufes.br, IP 200.137.65.106

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó Clotilde Fracalossi Cardoso

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Elianete Fracalossi Cardoso.

Ao meu pai, Fábio Daros de Freitas.

Aos meus irmãos, Jéssica Fracalossi Feijó e Rafael Fracalossi Freitas.

Ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo.

Ao Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Espírito Santo.

Aos meus amigos e orientadores do Laboratório de Metalurgia e Tratamentos Térmicos da Universidade Federal Fluminense.

Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal do Ceará.

RESUMO

Os dutos flexíveis são utilizados na indústria petrolífera para o transporte de petróleo e gás, sendo considerados uma opção vantajosa para os desafios encontrados na exploração de áreas mais profundas, como o pré-sal. Esses dutos são constituídos de diferentes camadas, dentre elas se encontra a armadura de tração, composta pela disposição de aramas de aço, que são responsáveis por resistir à tração, compressão e às cargas radiais aplicadas a este componente. Devido a aplicação de módulos complexos de tensão, seus modos de falha podem se tornar imprevisíveis, logo, o monitoramento para a verificação de sua integridade se torna essencial. A utilização de técnicas eletromagnéticas se apresenta como um bom método para a avaliação não destrutiva desses materiais. O presente trabalho visa apresentar informações que viabilizam a compreensão da influência das tensões residuais no comportamento do ruído magnético de *Barkhausen*. Para isso, serão analisadas as tensões residuais do arame proveniente de tubos flexíveis e correlacioná-la com parâmetros do rotacional do ruído magnético de *Barkhausen* e com o comportamento do envelope deste mesmo método. Para isso, na etapa experimental serão analisadas as tensões residuais, através do método de furo cego, das direções de transversal do dobramento, dobramento e 45° da transversal do dobramento. Seguindo será realizado o ensaio do rotacional do ruído magnético de *Barkhausen* nas frequências de 50 Hz e 125Hz. Após a parte experimental serão analisados e correlacionados os parâmetros de *RMS* e do envelope do ruído magnético de *Barkhausen* com a variação das tensões residuais. Vale ressaltar que com a deformação plástica há o desenvolvimento da anisotropia cristalina que também influencia diretamente os resultados colhidos. Nota-se que o rotacional do *RMS* apresenta uma caracterização mais objetiva com a anisotropia cristalina, enquanto o envelope do ruído magnético de *Barkhausen* apresenta uma compreensão melhor sobre a variação de tensão residual nas amostras analisadas, porém há um desafio em separar a influência das tensões residuais no envelope do ruído magnético em materiais que apresentam anisotropia cristalina.

Palavras-chave: Ruído Magnético de Barkhausen; Tensões Residuais; Anisotropia Cristalina; Propriedades Magnéticas

ABSTRACT

Flexible pipelines are used in the oil industry to transport oil and gas, being considered an advantageous option for the challenges encountered in the exploration of deeper areas, such as the pre-salt. These ducts are made up of different layers, including the traction reinforcement, made up of steel wires, which are responsible for resisting traction, compression and radial loads applied to this component. Due to the application of complex stress modules, their failure modes can become unpredictable, therefore, verify their integrity becomes essential. The use of electromagnetic techniques presents itself as a good method for the non-destructive evaluation of these materials. The present work aims to present information that makes it possible to understand the influence of residuals stress on the behavior of Barkhausen magnetic noise. To do this, the residuals stress in the flexible tubes will be tested and correlated with the rotational parameters of the Barkhausen magnetic noise and the envelope behavior of this same method. To this end, in the experimental stage, the residual stress will be proven, using the hole drilling method, in the direction of bending transverse, bending and 45° bending transversal. Next, the Barkhausen magnetic noise rotation test will be carried out at frequencies of 50 Hz and 125 Hz. After the experimental part, the RMS parameters and the Barkhausen magnetic noise envelope will be analyzed and correlated with the variation in residual stress. It is worth mentioning that with plastic deformation there is the development of crystalline anisotropy, which also directly influences the results collected. Note that the rotational RMS presents a more objective characterization of crystalline anisotropy, while the Barkhausen magnetic noise envelope presents a better understanding of the residual stress variation in the tested samples but is a challenge to separating the influence of residuals stress in the envelope of magnetic noise in materials that present crystalline anisotropy.

Keywords: Barkhausen Magnetic Noise; Residual Voltages; Crystalline Anisotropy; Magnetic Properties

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Tensões Residuais (2).....	5
Figura 2 – (a) Esquemático dos domínios magnéticos, (b) variação gradual do dipolo magnético nas proximidades da parede do domínio (8).....	10
Figura 3 – Esquemático do efeito da magnetização nos domínios magnéticos (9)....	11
Figura 4 – Representação da variação da curva de histerese para materiais duros e moles (9).....	12
Figura 5 – Variação de λ em relação a intensidade do campo H, para o Cobalto (Co), Ferro (Fe) e Níquel (Ni) (6).....	14
Figura 6 – Representação da variação do ciclo de magnetização para amostras sem tensão aplica e com tensão aplicada (8).....	15
Figura 7 - Representação do experimento de Barkhausen (10).....	16
Figura 8 - Ruído magnético de Barkhausen e curva de Histerese associada (10).....	17
Figura 9 – Esquemático do equipamento de medição de RMB (15).....	18
Figura 10 – Esquemático da seção transversal de um furo submetido a um estado de tensões, (a) sem a presença do furo e (b) após a usinagem do furo cego (3)	23
Figura 11 – Tipos de extensômetros (3).....	24
Figura 12 – Comparação entre a quantidade de dados apresentados pela medição óptica e por extensômetros, representados pelos quadrados.	25
Figura 13 – Esquemático do efeito da profundidade na deformação no método do furo cego (29).....	26
Figura 14 – Corpo de prova como recebido	28
Figura 15 – Representação das direções de análise da amostra	29
Figura 16 – Equipamento Rollscan 350, utilizado para os ensaios	30
Figura 17 – Sensor utilizado para o ensaio no equipamento Rollscan 350.....	30
Figura 18 – Suporte com variação de 15° para os ensaios magnéticos	31
Figura 19 – Equipamento Prims da Stresstech, utilizado para o ensaio de Furo Cego	32
Figura 20 – Esquemático das regiões de furação, onde o primeiro furo é referente a direção de 45 graus da transversal do dobramento, o segundo furo a direção transversal de dobramento e o terceiro a direção de dobramento.....	32
Figura 21 – Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 1, lado convexo.....	33
Figura 22 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 1, lado côncavo.....	34

Figura 23 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 2, lado convexo.....	34
Figura 24 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 2, lado côncavo.....	35
Figura 25 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 3, lado convexo.....	35
Figura 26 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 3, lado côncavo.....	36
Figura 27 – Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 1, lado convexo.....	38
Figura 28 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 1, lado côncavo.....	38
Figura 29 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 2, lado convexo.....	38
Figura 30 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 2, lado côncavo.....	38
Figura 31 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 3, lado convexo.....	39
Figura 32 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 3, lado côncavo.....	39
Figura 33 – Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	40
Figura 34 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	40
Figura 35 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	41
Figura 36 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	41
Figura 37 – Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz	43
Figura 38 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz	43
Figura 39 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz	44
Figura 40 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz	44
Figura 41 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz	45
Figura 42 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz	45
Figura 43 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz	46
Figura 44 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz	46

Figura 45 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz.....	47
Figura 46 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz.....	47
Figura 47 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz.....	48
Figura 48 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz.....	48
Figura 49 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	50
Figura 50 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	50
Figura 51 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz	50
Figura 52 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz	50
Figura 53 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	51
Figura 54 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	51
Figura 55 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz	51
Figura 56 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz	51
Figura 57 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz.....	52
Figura 58 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz.....	52
Figura 59 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	52
Figura 60 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	52
Figura 61 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz	53

Figura 62 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz	53
Figura 63 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	53
Figura 64 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	53
Figura 65 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz.....	54
Figura 66 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz.....	54
Figura 67 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz	54
Figura 68 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz	54
Figura 69 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	55
Figura 70 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	55
Figura 71 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz.....	55
Figura 72 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz.....	55
Figura 73 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz	56
Figura 74 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz	56
Figura 75 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz	56
Figura 76 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz	56
Figura 77 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz.....	57
Figura 78 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz.....	57

Figura 79 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz	57
Figura 80 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais processos de geração de Tensões Residuais (1).	4
Tabela 2 – Principais métodos de análise de Tensões Residuais (5), (3).	6
Tabela 3 – Profundidade aproximada do sinal do RMB x Frequência de excitação (9).	21
Tabela 4 – Comparação entre as técnicas Ópticas e com Extensômetro para o ensaio de furo cego (29).	25
Tabela 5 - Composição química do aço estudado (30)	27

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

RMS – Root Mean Square

RMB – Ruído Magnético de Barkhausen

H – Campo magnético [A/m]

l – Comprimento da bobina [m]

N – Número de espiras

I – Intensidade da corrente elétrica [A]

B = Densidade de Fluxo magnético [T]

μ_0 – Permeabilidade magnética no vácuo [$\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ T.m/A]

δ_{ep} – Profundidade eletromagnética (m);

f - Frequência de excitação (Hz);

σ_{el} – Condutividade do material;

μ_r – Permeabilidade magnética relativa do material.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract	vi
Lista de ilustrações	ix
Lista de tabelas	xv
Lista de símbolos.....	xvii
Sumário	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Motivações	2
1.2 Objetivo Geral	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Tensões Residuais	3
2.1.1 Geradores das Tensões residuais.....	3
2.1.2 Classificação das Tensões Residuais.....	5
2.1.3 Métodos de Determinação das Tensões Residuais.....	6
2.2 Conceitos fundamentais do Magnetismo.....	7
2.2.1 Campo Magnético Induzido	7
2.3 Comportamento Magnético dos Materiais	9
2.3.1 Domínios magnéticos	9
2.3.2 Anisotropia Magnetocristalina	12
2.3.3 Magnetostricção e Magnetoelasticidade	13
2.4 Ensaios Magnéticos	15
2.4.1 Ruído Magnético de Barkhausen	15
2.4.2 Medição do Ruído Magnético de Barkhausen	17
2.4.3 Parâmetros de Análise do RMB	18
2.4.4 Parâmetros que afetam o RMB	21

2.5	Método do Furo Cego	23
2.5.1	Sensibilidade do Método do furo Cego	26
2.5.2	Ensaio Preliminares Sobre o Material Utilizado	26
3	Metodologia	28
3.1	Materiais.....	28
3.2	Técnicas de ensaio	29
3.2.1	Ensaio de Ruído magnético de Barkhausen.....	29
3.2.2	Ensaio de Furo Cego.....	31
4	Resultados Experimentais	33
4.1	Ensaio de Furo Cego	33
4.2	Ruído Magnético de Barkhausen	37
4.2.1	Rotacional do <i>RMS</i>	37
4.2.2	Envelope do Ruído Magnético de <i>Barkhausen</i>	39
5	Conclusões	49
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	49
6	ANEXOS	50
7	Referências Bibliográficas	58

1 INTRODUÇÃO

Para se adaptar às condições marítimas adversas, as operações em águas profundas exigem cada vez mais equipamentos de grande escala e alto desempenho, como dutos flexíveis. Eles são submetidos a vários modos complexos de tensão, como compressão, devido à pressão submarina, tração e flexão, devido às movimentações das correntes submarinas e tensões residuais proeminentes da fabricação.

Devido aos modos de tensão complexas apresentados é preferível a utilização de tubulações flexíveis com armaduras metálicas não ligados, que são compostas por estruturas independentes de várias camadas, projetadas para resistir os diferentes tipos de cargas aplicadas e a corrosão. Eles apresentam também uma camada de carcaça e uma de armadura de pressão para suportar cargas radiais, aplicadas a eles, uma camada de bainha interna para a vedação do ambiente, duas camadas de armadura de tração para rigidez axial, uma camada externa para resistir a danos e camada antidesgaste entre as duas camadas metálicas de tração.

Om o aumento da profundidade do oceano, a camada de tração se torna mais necessária para resistir as cargas mais complexas. Para uma tubulação flexível, a armadura se constitui de vários fios de aço em espiral em direções e ângulos específicos. Dessa forma, a pesquisa sobre o comportamento mecânico da camada de armadura é um tópico importante e que suscitou resultados interessantes.

A formação desses fios envolve uma significativa deformação plástica: torção e flexão repetida dos fios em diferentes planos. Portanto, os fios de armadura em tubulações são considerados como contendo tensões residuais, sendo ela essencial para a tomada de decisão para os projetos, objetivando alta confiança para atender aos requisitos de utilização do material.

Assim, se faz necessária a compreensão da variação dos gradientes de tensão residual que são apresentados pelo material. Assim como, a busca de correlação com os ensaios não destrutivos, que facilitam a análise do comportamento do material sem a necessidade de invalidação da sua utilização.

1.1 MOTIVAÇÕES

Devido a necessidade de uma alta confiabilidade para a aplicação do material, já que é utilizado em tubulações que conduzem petróleo e sofrem com diferentes graus de aplicação de tensão, buscou-se nesse texto detalhar a variação do comportamento magnético do material com a variação de tensões residuais no arame.

A motivação principal é exatamente essa correlação que pode trazer uma nova perspectiva de análise das propriedades mecânicas do material em forma de ensaios não destrutivos que podem ser aplicados em campo, sem a necessidade de transferência para laboratórios de análise.

1.2 OBJETIVO GERAL

Objetiva-se com esse trabalho a compreensão da correlação das propriedades magnéticas do arame estudado com as tensões residuais contidas no material. Assim, buscando novas técnicas de análise das propriedades mecânicas do material, sem a necessidade de invalidar a sua utilização em campo, trazendo assim uma celeridade na análise de possíveis falhas que podem apresentar o material e gerando assim uma melhor confiabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são caracterizadas como as tensões remanescentes em um material, sem a presença de cargas externas ou gradientes térmicos. Elas podem ser geradas por diversos motivos, como por exemplo, deformações plásticas, precipitados, transformações de fase, erros de montagem, deformações causadas pela expansão térmica, entre outros.

2.1.1 Geradores das Tensões residuais

2.1.1.1 Gradientes Térmicos

As tensões residuais podem resultar da distribuição não uniforme de temperatura em uma região do material. Além disso, podem ser oriundas da diferença do coeficiente térmico entre fases adjacentes do material, que ocasionam a deformação plástica localizada (1).

2.1.1.2 Propriedades Metalurgia

As tensões residuais podem ser geradas devido a diferença entre as propriedades elásticas e cristalinas de fases adjacentes, decorrentes de reações químicas ou transformações de fase, logo tensões residuais presentes pela consequência da dilatação volumétrica localizada (1).

2.1.1.3 Propriedades Mecânicas

As tensões residuais podem ter origem na deformação plástica não uniforme em alguma região do material, causada principalmente por um processo de conformação mecânica (1).

Tabela 1 – Principais processos de geração de Tensões Residuais (1).

Origem	Processo	Observação
Deformação Mecânica	Conformação mecânica	Laminação, Estampagem, Extrusão, Estiramento
	Autofretagem	Armas, Vasos de Pressão
	Conformação Superficial	Jateamento
	Processos de Usinagem	Torneamento, fresagem, Retificação e Furação
Transformação de Fase	Soldagem	Todos os Tipos
	Tratamento Térmico	Têmpera e Normalização
Contração ou Expansão Térmica	Processos de Usinagem	Torneamento, Fresamento, Retificação e Furação
	Soldagem	Todos os tipos
	Tratamento Térmico	Têmpera e Normalização
	Fundição	Grandes dimensões
	Tratamento Termoquímico	Cementação e Nitretação
Desigualdades Estruturais	Montagem e Ajustes	Estruturas, desalinhamento de uniões
	Bimateriais	Peças bimetálicas
Microestrutura	Materiais compósitos	Todos
	Materiais Agregados à superfície	Deposições de plasma, revestimentos protetores e antidesgastante
	Tratamentos Térmicos	Têmpera e Normalização

Sabe-se que regiões plastificadas podem ocorrer em vigas submetidas a momentos fletores, que quando é retirado o carregamento referente a região elástica é aliviada, “spring-back”, restando uma distribuição de tensões que para um ponto inicialmente tracionado, a tensão residual seria compressiva. Há a possibilidade de realização de uma estimativa das tensões residuais, pelo princípio de sobreposição, que consideram as tensões do momento fletor e em seguida a retirada do carregamento (2).

Contudo na fase de carregamento as tensões descrevem o comportamento com plastificação parcial. Já na fase de descarregamento o comportamento do material é linear elástico (2).

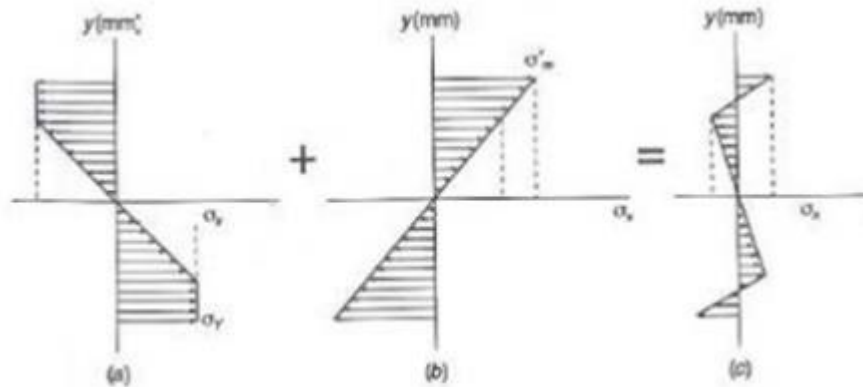


Figura 1 – Diagrama de Tensões Residuais (2).

2.1.2 Classificação das Tensões Residuais

As tensões residuais podem ser classificadas como, tensões do Tipo I, de primeira ordem, Tipo II, segunda ordem e Tipo III, terceira ordem. Nesta seção serão detalhadas as três ordens referentes as tensões residuais.

2.1.2.1 Tensões Residuais Macroscópicas (Tipo I)

Sendo as tensões de maior interesse em estudos, as tensões do tipo I, são tensões residuais que se distribuem em larga escala por todo o material. Elas são originadas principalmente pelos processos de manufatura e se superpõem as tensões externas aplicadas ao material (2), (3).

2.1.2.2 Tensões Residuais Microscópicas (Tipo II)

As tensões do tipo II são caracterizadas por tensões que se distribuem em pequena escala, relativo a um grupo de grãos que tem origem na heterogeneidade e na anisotropia de cada cristal ou grão de um material policristalino (2).

Assim, geralmente são causadas em materiais com grãos orientados aleatoriamente, por causa do escoamento que pode ocorrer primeiro nos grãos nos quais os planos de deslizamento coincidem aproximadamente com os planos de tensão de cisalhamento. Assim, quando há a retirada de uma carga aplicada, os grãos que escoaram tendem a manter a deformação permanente (2), (4).

2.1.2.3 Tensões Residuais Microscópicas (Tipo III)

As tensões do tipo II são caracterizadas como tensões residuais existentes na escala atômica, correspondente pela ação dos defeitos cristalino e podem ser chamadas de tensões residuais submicroscópicas.

Logo, podem ser consideradas como resultantes de imperfeições da rede cristalina, geralmente é identificada nas proximidades de uma discordância. Sendo que, o equilíbrio ocorre ao longo de pequenas frações de um grão. No entanto, essas tensões não são direcionais a nível macroscópico e geralmente não apresentam influência direta no comportamento mecânico macroscópico (2), (4).

2.1.3 Métodos de Determinação das Tensões Residuais

Existem algumas técnicas para a medição de tensões residuais, sendo elas, destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas. Sendo a escolha do método dependente de vários fatores como a natureza do campo de tensão residual, do tempo disponível para a medição, a incerteza desejada, entre outros. Alguns métodos são apresentados abaixo (5).

Tabela 2 – Principais métodos de análise de Tensões Residuais (5), (3).

Classificação	Método	Observação
Não destrutivo	Difração de raio X	Variação entre os planos atômicos.
	Difração de Nêutrons	Variação das distâncias atômicas, porém com inspeção em todo o volume.
	Método Ultrassônico	Variação da velocidade das ondas ultrassônicas no interior do material.
	Método Magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito de Barkhausen.
Semidestrutivos	Método do Furo Cego	Execução de um furo de diâmetro entre 0,8 mm a 3,2 mm.

Destrutivos	Método de Deflexão	Camadas são retiradas através de ataque químico ao material.
	Método do Seccionamento	Cortes parciais, longitudinais ou transversais, ao eixo de peças axissimétricas.

2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO MAGNETISMO

O ser humano tem contato com o magnetismo há milhares de anos, sendo iniciado com a magnetita, minério encontrado na Grécia, e que apresenta magnetização natural. No entanto, só a partir do século XVIII, com o experimento realizado por Oersted, que o magnetismo começou a ser entendido e posteriormente correlacionado com a eletricidade, sob contribuição de cientistas como Faraday e Ampère (6).

Contudo, hoje já se sabe que o campo magnético é gerado pela movimentação de cargas elétricas no material.

Nesta seção, serão apresentados alguns conceitos importantes sobre o magnetismo.

2.2.1 Campo Magnético Induzido

Ao se aplicar uma diferença de potencial nas extremidades de um fio condutor enrolado, os elétrons presentes nesse material são postos em movimento e dessa forma gerando uma corrente elétrica que percorre todo o material. A corrente elétrica por sua vez gera um campo magnético em volta do fio condutor, que pode ser observado através de um simples experimento de posicionar limalhas de ferro próximas a superfície onde o fio condutor está apoiado. As limalhas por sua vez, se orientam na forma do campo magnético (6).

A densidade de fluxo magnético, com unidade de medida Tesla, é interpretada como o campo magnético concentrado em uma determinada área da seção do fio condutor. As equações abaixo apresentam como é calculado tanto o campo magnético produzido pela corrente elétrica (H) como a densidade de fluxo magnético (B) (7).

$$H = \frac{NI}{l} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

H – Campo magnético [A/m];

l – Comprimento da bobina [m];

N – Número de espiras;

I – Intensidade da corrente elétrica [A].

$$B = \mu_0 \cdot H \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

B = Densidade de Fluxo magnético [T];

μ_0 – Permeabilidade magnética no vácuo [$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ T.m/A].

Caso seja adicionado no dentro das espirais da bobina um núcleo magnético de ferro, é notório que a densidade do fluxo magnético será maior, já que a permeabilidade magnética do ferro é maior que a permeabilidade magnética do ar. Logo a equação para a densidade de fluxo se torna:

$$B = \mu \cdot H \quad \text{Equação 3}$$

Onde, μ é a permeabilidade magnética do material [H/m].

Para esse caso, quando há a presença de um campo magnético aplicado, os momentos magnéticos tendem a se alinhar com o campo e assim acrescentam uma intensidade a ele. Logo a equação de densidade do fluxo magnético é alterada para :

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad \text{Equação 4}$$

Onde, M é chamada de magnetização do sólido e é proporcional ao campo aplicado como mostra a Equação 5

$$M = \chi_m \cdot H \quad \text{Equação 5}$$

Onde, χ_m é a suscetibilidade magnética, sendo ela a capacidade que um material tem de se magnetizar, e é descrita pela equação. A suscetibilidade magnética é uma grandeza adimensional.

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad \text{Equação 6}$$

Onde, μ_r é a permeabilidade relativa e é descrita como

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{Equação 7}$$

2.3 COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DOS MATERIAIS

O comportamento magnético dos materiais se relaciona diretamente com a distribuição eletrônica dos elementos químicos presentes nele. A reação a presença de um campo magnético é correlacionada aos momentos magnéticos da estrutura interna dos átomos.

Contudo, se um elemento possuir todos os seus subníveis preenchidos, terá todos os momentos anulados, sendo insensível ao campo magnético externo, neste caso se tem um elemento diamagnético. Logo, os materiais diamagnéticos apresentam um campo induzido no seu interior com menor intensidade que no vácuo.

Já os elementos que não apresentam seus subníveis totalmente preenchidos, o número de elétrons com *spin* em um sentido é diferente do número de elétrons com *spin* no sentido contrário. Logo, o momento magnético global não é nulo. Em elementos como ferro, os momentos magnéticos são suficientemente fortes e com a proximidade que eles ficam no reticulado cristalino permite que haja um alinhamento magnético espontâneo entre os átomos. Essas são características de um material dito ferromagnético (6).

2.3.1 Domínios magnéticos

Os domínios magnéticos são regiões onde existe um alinhamento dos dipolos magnéticos em uma mesma direção. Materiais ferromagnéticos, em temperatura inferior a temperatura de Curie, apresentam regiões volumétricas nas quais se apresentam o comportamento anteriormente citado (7).

Os domínios são separados pelas paredes dos domínios, que são regiões com gradual rotação dos momentos de dipolo que variam entre as orientações dos domínios em que a estas dividem, representada na Figura 2.

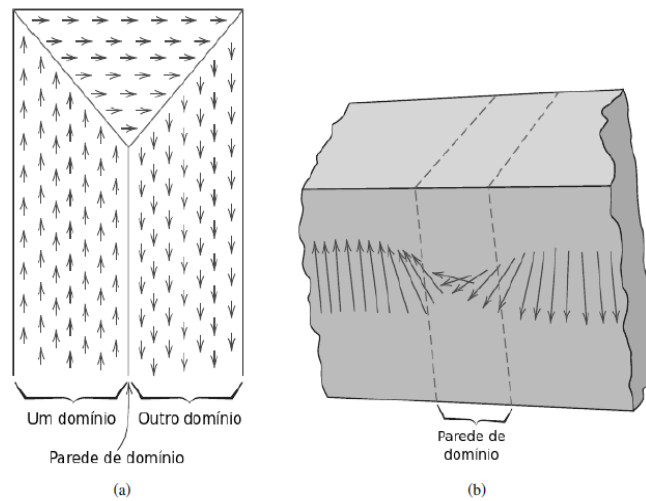


Figura 2 – (a) Esquemático dos domínios magnéticos, (b) variação gradual do dipolo magnético nas proximidades da parede do domínio (8)

No entanto, geralmente os domínios magnéticos apresentam dimensões microscópicas, sendo que cada grão de um material pode possuir mais de um domínio magnético. Sendo o campo magnético uma grandeza vetorial, a somatória vetorial da magnetização de todos os domínios representa a magnetização total do material. Sendo que, em uma amostra não magnetizada as diferentes orientações dos domínios distribuídos, tendem a apresentar uma anulação da magnetização total dela.

Contudo, quando aplicado um campo externo, os domínios magnéticos se movimentam na direção desse campo, podendo esse movimento ser irreversível ou não a depender do material com o qual o campo interage.

Quando é aplicado em um material ferromagnético um campo externo com intensidade H , conforme há o aumento desse campo magnético, a intensidade do campo induzido B , comporta-se de forma diferente, como pode ser observado no esquemático apresentado na Figura 3. Inicialmente, o campo induzido apresenta baixa variação em relação ao campo externo, devido ao material apresentar baixa permeabilidade magnética inicial (μ_i), e assim, há uma magnetização reversível. Com o aumento da intensidade do campo externo, há a rotação irreversível dos domínios magnéticos, que se realinham em direção ao campo aplicado ao material, aumentando a densidade de campos alinhados em uma mesma direção. Nesse momento, atinge-se uma permeabilidade magnética máxima (μ_{\max}).

Assim, aumentos posteriores do campo magnético aplicado, produzem baixo aumento do induzido, ou seja, a permeabilidade magnética torna-se novamente baixa, tendo somente a função de continuar o movimento de rotação dos momentos magnéticos, até que eles coincidam com o campo aplicado (8).

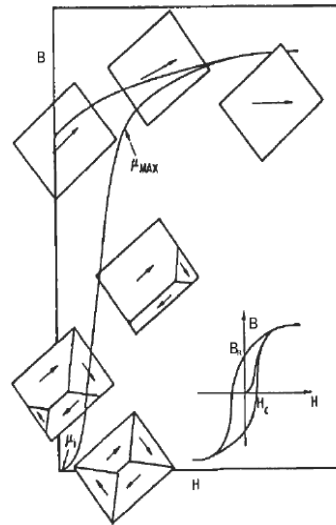


Figura 3 – Esquemático do efeito da magnetização nos domínios magnéticos (9)

Com a diminuição gradativa do campo aplicado, é apresentado um efeito de histerese, no qual o campo induzido diminui de intensidade em uma taxa menor que o aplicado. Quando o campo aplicado no material se torna zero novamente, o material ainda apresentará uma magnetização, chamada de indução remanescente (B_R). Além disso, também há a presença da polarização necessária para anular totalmente o campo magnético induzido no material, e ela é chamada de força coercitiva ou simplesmente de coercividade (H_C).

Além disso, a curva de histerese pode apresentar variação devido a facilidade ou não de se magnetizar um material. Um material caracterizado como mole, apresenta uma fácil magnetização, enquanto um material caracterizado como duro, apresenta uma dificuldade de magnetização. Dessa forma, quanto mais duro o material é maior será a área apresentada no laço de histerese, já que a força coerciva apresentará alto valor, ou seja, esse material possui alta resistência a desmagnetização, como representado na Figura 4.

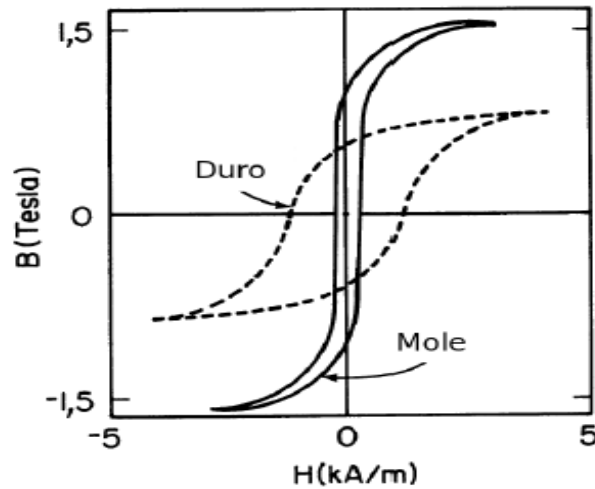


Figura 4 – Representação da variação da curva de histerese para materiais duros e moles (9).

Adicionalmente, estudos observaram que o aumento dos defeitos cristalinos, podem também alterar o ciclo de histerese de um material. Essa modificação, pode ser explicada devido a necessidade de uma alta energia de magnetização para vencer os pontos de ancoragem apresentados durante a movimentação dos domínios magnéticos. Logo, ao desmagnetizar um material aplicando um campo magnético de polarização inversa, há a reposição da energia perdida durante o processo de magnetização (6).

2.3.2 Anisotropia Magnetocristalina

Há nos materiais ferromagnéticos a presença de direções cristalográficas que facilitam a sua magnetização. Assim, em um monocristal, haverá uma gama de direções na qual a saturação magnética ocorrerá mais facilmente, sendo chamadas assim de direções de fácil magnetização.

Dessa forma, um mono cristal ferromagnético, apresentará direções de alinhamento do campo magnético em que a coercividade apresentará menor valor. Para o ferro, a família de direções de fácil magnetização é a $\langle 100 \rangle$.

Sendo apresentado um material policristalino com grãos orientados em direções cristalográficas aleatórias, porém sem textura, a coercividade e o campo magnético remanescente tendem a apresentar o mesmo valor em todas as direções de magnetização, logo, apresentando uma baixa anisotropia magnética. No entanto, processos que envolvem principalmente deformações plásticas no material, levam a formação de texturas, que são a

presença de orientações cristalográficas preferenciais dos grãos cristalino, causando assim anisotropia magnética (6).

2.3.3 Magnetostricção e Magnetoelasticidade

Modificações no campo magnético podem gerar variações na dimensão de um material ferromagnético. Sendo esse efeito chamado de magnetoestricção ou efeito Joule.

A magnetoestricção é a deformação ocorrida durante o processo de saturação durante a magnetização e é dada pela equação abaixo.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \qquad \text{Equação 8}$$

Onde:

l - Comprimento total do material;

Δl – Variação de comprimento do material.

O princípio diz que, um material submetido a um campo magnético sofre um deslocamento devido ao movimento de rotação dos domínios magnéticos, quando eles tendem a se alinhar com o campo aplicado. Considerando principalmente o movimento das paredes de 90°, que geram um aumento de paredes de domínio de 180°, como responsáveis por esse fenômeno.

A magnetoestricção varia de acordo com o campo magnético aplicado ao material, a Figura 5 apresenta essa variação.

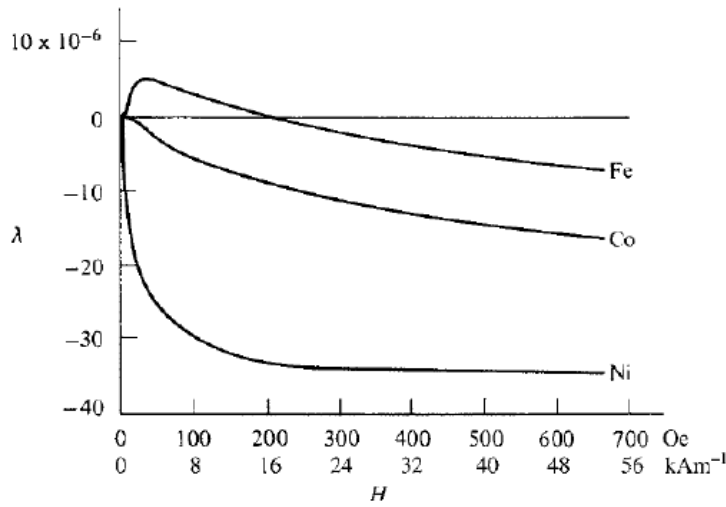


Figura 5 – Variação de λ em relação a intensidade do campo H , para o Cobalto (Co), Ferro (Fe) e Níquel (Ni) (6).

Observa-se que tanto o cobalto quanto o níquel apresentam uma contração quando é aplicado um campo magnético a eles. No entanto, o ferro apresenta uma dilatação para campos elétricos de baixa intensidade e uma contração para campos elétricos de intensidade maiores que 200 kAm^{-1} .

Já a magnetostricção ou efeito Villari, é o resultado das alterações da magnetização de um material devido às deformações causadas pela aplicação de tensão nele. Para um material com magnetostricção positiva, quando se aplica uma tensão no regime elástico os domínios magnéticos com direções parecidas com a direção de aplicação da tensão crescem, enquanto os com direções perpendiculares diminuem. Devido a isso, também há um aumento das paredes de domínios de 180° . A Figura 6, apresenta graficamente essa variação.

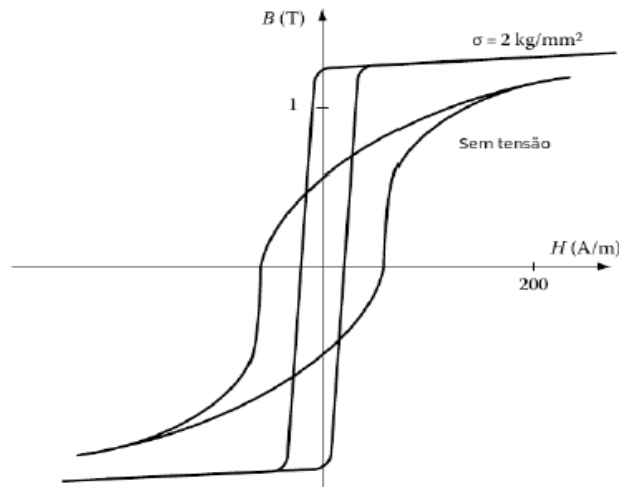


Figura 6 – Representação da variação do ciclo de magnetização para amostras sem tensão aplica e com tensão aplicada (8)

Ao analisar o gráfico apresentado pela Figura 6, observa-se que o ciclo de histerese fica mais estreito quando aplicado a tensão mecânica no material, indicando uma maior facilidade de magnetização dele, devido a uma menor coercividade apresentada. Além disso, há um aumento da indução remanescente no material.

2.4 ENSAIOS MAGNÉTICOS

A seguir será apresentada a técnica de análise empregada neste trabalho. Esta técnica foi escolhida por ser mais adequada aos objetivos deste trabalho.

2.4.1 Ruído Magnético de Barkhausen

O ruído magnético de Barkhausen é caracterizado como um fenômeno de mudanças descontínuas na densidade de fluxo magnético (B), dentro de um material ferromagnético, quando submetido a um campo magnético variável. O pesquisador alemão Heinrich Barkhausen (1919) em seus estudos, sobre acústica em magnetismo, observou que quando se magnetiza uma barra de ferro, pulsos de tensão elétrica, de curta duração, são induzidos em uma bobina enrolada em torno dessa barra. Contudo, mesmo após a mudança lenta do campo de magnetização, as discontinuidades continuam, e com isso, se observa que o fenômeno ruído magnético de Barkhausen é discreto (10).

Com a mudança no estado de magnetização do material ferro magnético, foi observado a emissão de ruídos que poderiam ser ouvidos através do aparelho amplificador indicado na Figura 7.

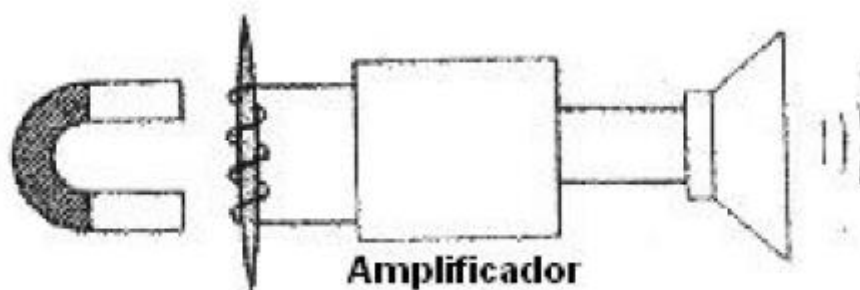


Figura 7 - Representação do experimento de Barkhausen (10).

Quando há a dinâmica do crescimento e diminuição dos domínios magnéticos, assim que um material ferro magnético é magnetizado, as paredes dos domínios magnéticos se movimentam para que esse evento ocorra. No entanto, caso seja encontrado obstáculos, como discordâncias, precipitados ou contornos de grão é criado um ponto de ancoragem e a movimentação dos domínios é, a princípio, restringida. Contudo, conforme há o aumento do campo magnético aplicado, o ponto de ancoragem é vencido e, como consequência, são liberados pulsos magnéticos, que são percebidos em forma de degraus nos gráficos de magnetização (6), (11).

Os pulsos caracterizados pelo efeito Barkhausen são observados em sua maior parte pelo movimento irreversível das paredes do domínio em 180° , esses eventos acontecem na região de maior inclinação da curva de histerese magnética. Enquanto ocorre a magnetização, movimentos de paredes do domínio em 90° , rotação de domínios, e aniquilação de paredes podem contribuir para a magnetização (12). Contudo, há uma diminuição do movimento das paredes quando o processo se aproxima da saturação magnética, até que não sejam mais emitidos pulsos magnéticos. Sendo que, o pico máximo dos pulsos é localizado no campo coercivo (H_c), local onde a curva de histerese encontra com o eixo horizontal do gráfico (8). A Figura 8 representa um exemplo do comportamento na medição dos efeitos produzidos no material

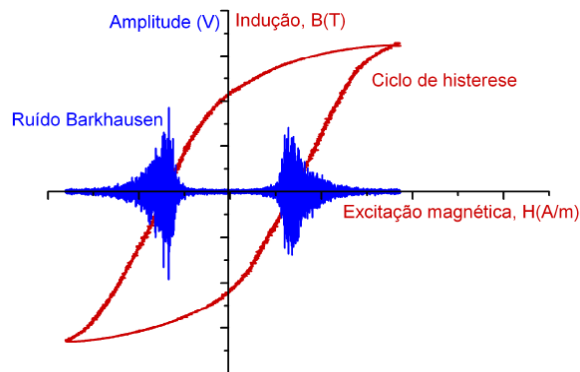


Figura 8 - Ruído magnético de Barkhausen e curva de Histerese associada (10).

Adicionalmente, sendo adotado o objetivo de manter continuamente a geração dos pulsos referentes ao efeito Barkhausen pode-se excitar o material com um campo magnético oscilante. E dessa forma, o processo anteriormente descrito se repete reagindo a mudança de polarização do campo magnético, assim, se mantém a movimentação dos domínios, enquanto o campo oscilante estiver presente (13).

2.4.2 Medição do Ruído Magnético de Barkhausen

A medição do RMB é realizada através de uma sonda, também chamada de *yoke*, esquematizada na Figura 9. Esse sistema consiste em uma bobina, de excitação, envolvida em um núcleo magnético e uma bobina leitora para a captação dos pulsos magnéticos que são emitidos pelo material.

Há a aplicação, através da sonda, de um campo oscilante fornecido por uma fonte de corrente alternada, sendo ela senoidal ou triangular, ligados nas extremidades da bobina de excitação. Posteriormente os pulsos magnéticos gerados, sob a forma de tensão, através dos terminais da bobina leitora são amplificados e filtrados, seguindo para a análise com o auxílio de programas computacionais (14).

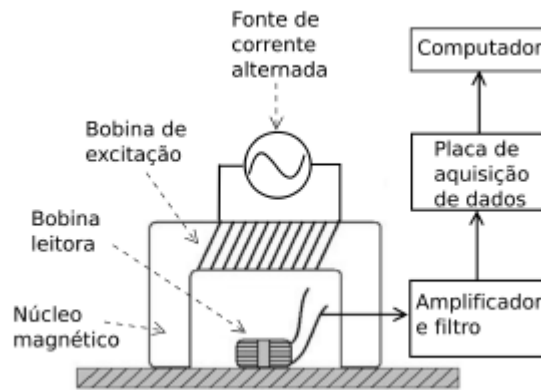


Figura 9 – Esquemático do equipamento de medição de RMB (15)

2.4.3 Parâmetros de Análise do RMB

Nesta seção serão apresentados os principais parâmetros utilizados para correlacionar os sinais de Barkhausen com as propriedades mecânicas do material e sua microestrutura (16).

2.4.3.1 Root Mean Square (RMS)

O termo *root mean square*, apresenta tradução literal para média quadrática. Sendo assim, ela a representação da tensão média quadrática medida pela sonda após a aparição do efeito *Barkhausen*, sendo calculada pela equação apresentada abaixo. RMB_{rms}

$$RMB_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_m)^2}{N-1}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

V_i – Valor da voltagem medida em um determinado instante;

V_m – Média da tensão calculado no conjunto amostral;

N – Número de medições de tensão por conjunto amostral.

Como a média do sinal do ruído magnético de *Barkhausen* tende a zero, se utiliza a tensão eficaz com o equivalente ao desvio padrão do sinal de RMB, portanto a intensidade do desvio médio da tensão ao redor da amostra (17).

Quando analisado no sentido de anisotropia magnética cristalina, o rotacional do *RMS* pode ser utilizado para estimar a energia da anisotropia magnetocristalina do material e assim o comportamento cristalino apresentado pelo material analisado (19) (20).

2.4.3.2 Energia do Sinal RMB

A energia liberada pelo sinal de RMB é calculada pela fórmula apresentada abaixo. Assim, se é calculado a área entre o eixo do tempo e o quadrado do sinal da voltagem, para cada evento, e somado sobre todos os eventos medidos (14).

$$RMB_{energia} = \sum_{i=1}^N V_i^2 * \Delta t \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

V_i – Valor de tensão medida em um determinado instante

Δt = intervalo de tempo entre os pontos do sinal

2.4.3.3 Envelope do sinal

Através de uma função analítica, pode ser obtido o envelope do sinal de RMB, sendo aplicada a transformada de Hilbert sobre o valor absoluto do sinal. A equação abaixo apresenta a expressão da transformada anteriormente mencionada (18).

$$Hx(t) = f^{-1}\{e^{-i\pi/2}f\{x(t)\}sgn(f)\} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

\mathcal{F} – Indica a integral de Fourier;

Sgn – Função *sin*al;

$x(t)$ – A função no tempo ao qual se deseja o envelope.

Após a obtenção o envelope do sinal RMB, há a possibilidade de análise de alguns parâmetros, como a amplitude do envelope, posição do pico e a largura da amplitude média do pico.

A anisotropia magnética cristalina apresentada por um material é correlacionada com o primeiro pico do envelope do ruído magnético de *Barkhausen*, sendo ele pertencente à região de direcionamento da saturação magnética do fluxo magnético para a campo coercivo, sendo ele caracterizado como o ponto final da rotação das paredes dos domínios magnéticos (20).

Contudo, as tensões aplicadas ao material tendem a diminuir o valor do pico do envelope e deslocá-lo para a esquerda, para tensões compressivas, enquanto para tensões tratativas o comportamento esperado é o inverso (23).

2.4.3.4 Profundidade de medida do RMB

Quando há a excitação de um material a partir de um campo magnético oscilante, há a geração de um fluxo circular de elétrons ao redor das linhas de campo que penetram no material, produzindo assim correntes chamadas de parasitas.

No entanto, devido a um efeito amortecedor que essas correntes, há uma menor profundidade de interação do campo magnético imposto ao material com a amostra. Sendo esse efeito chamado de efeito pele (9).

A profundidade na qual é indicada pela equação abaixo (9):

$$\delta_{ep} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \sigma_{el} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

δ_{ep} – Profundidade eletromagnética (m);

f - Frequência de excitação (Hz);

σ_{el} – Condutividade do material;

μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo;

μ_r – Permeabilidade magnética relativa do material.

A Tabela 3 apresenta as profundidades de pele, obtidas em função de várias frequências de magnetização, para materiais ferrosos com μ_r , entre 50 e 5000, e σ_{el} , entre $5 \cdot 10^6$ e $10 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$.

Tabela 3 – Profundidade aproximada do sinal do RMB x Frequência de excitação (9).

Frequência de Excitação (Hz)	Faixa de Valores de δ_{ep} (mm)
10	0,71 – 10
50	0,31 – 4,5
100	0,22 – 3,2
500	0,10 – 1,40
1.000	0,07 -1,00
5.000	0,03 -0,45
10.000	0,022 – 0,32
50.000	0,010 – 0,14
100.000	0,007 – 0,100
500.00	0,003 – 0,045

2.4.4 Parâmetros que afetam o RMB

2.4.4.1.1 Frequência de Magnetização

Aplicando um campo magnético alternado em um material condutor, como na aplicação da técnica RMB, há o surgimento de *correntes parasitas*. Estas *correntes parasitas* geram um campo magnético no interior do material, se opondo ao campo induzido (B), atenuando as emissões de RMB. Desta forma, quanto maior a frequência de excitação magnética, maior o amortecimento por estas correntes contrárias (19).

Com isso, quanto maior a frequência de excitação menor será a profundidade de análise no material. Logo, quando se aumenta a frequência os resultados do RMB representarão melhor as camadas mais próximas da superfície do material (20).

2.4.4.1.2 Dureza

Estudos diversos têm correlacionado o sinal de RMB com a dureza em materiais submetidos a tratamentos térmicos. De forma geral, há uma concordância de que os parâmetros amplitude e tensão eficaz do sinal de Barkhausen, possuem uma tendência linear inversamente proporcional com a dureza, enquanto a posição do sinal do pico do envelope apresenta uma tendência linear proporcional (21).

Para isso, a explicação para essas relações se dá pelo fato que o aumento da dureza mecânica e magnética geralmente elevarem a quantidade de defeitos cristalinos, e esses defeitos se tornam pontos de ancoragem para as paredes do domínio, gerando assim a diminuição da

amplitude do sinal do ruído magnético de Barkhausen e o aumento da posição do pico do sinal do envelope se dá devido ao aumento de H_c (22).

2.4.4.1.3 Intensidade de Magnetização

Estudos indicam que com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado, maior será a voltagem do sinal RMB. No entanto, há um valor de saturação, que quando atingido, o valor de RMB começa a decrescer.

Esse mecanismo pode ser explicado pela movimentação dos domínios sobre influência de campos magnéticos com baixa intensidade, logo, com o aumento do campo magnético as paredes de domínio magnético atingem a energia para ultrapassar os pontos de ancoragem. Dessa forma, há o desaparecimento da movimentação das paredes sob influência desses campos magnéticos maiores (23).

2.4.4.1.4 Tamanho de Grão

Estudos que correlacionam a influência do tamanho de grão no sinal do ruído magnético de barkhausen, ainda apresentam resultados inconclusivos. No entanto, alguns artigos relatam que o aumento do sinal do ruído magnético de barkhausen é diretamente proporcional ao aumento do tamanho de grão (24).

Trabalhos objetivam justificar essa relação, pelo fato de que o sinal de RMB depende diretamente da liberdade de movimentação das paredes do domínio, e já que com o aumento do tamanho do grão pode gerar um aumento da distância entre os pontos de ancoragem, a intensidade do pulso dos sinais de barkhausen aumentam (25).

Além disso, com a diminuição do tamanho de grão tende-se a aumentar o número de paredes de domínio e conseqüentemente domínios magnéticos, o que pode gerar uma menor intensidade dos pulsos de barkhausen, já que se eleva a quantidade de pulsos (9).

2.4.4.2 Efeito das Tensões no RMB

Resultado referentes às pesquisas relacionadas com a influência das tensões elásticas no comportamento do ruído magnético de barkhausen, indicam que há uma tendência ao aumento do sinal de RMB com a presença de tensões trativas e um decréscimo na presença de tensões compressivas (26).

Esse resultado é explicado pela teoria da energia magneto-elástica, na qual há um aumento das paredes de domínio de 180° na direção da aplicação de força trativa, esse movimento quando associado a aplicação da excitação magnética externa, faz com que o sinal

de RMB aumente. Contudo, quando o material é comprimido se induz as paredes dos domínios a se posicionarem perpendicularmente à tensão aplicada, resultando dessa forma em um decréscimo do valor do sinal de RMB (27).

Na região onde há a deformação plástica, estudos apontam que inicialmente há um aumento na intensidade do sinal de RMB devido principalmente ao alinhamento da base de fácil magnetização a da tensão aplicada. No entanto, com a evolução da textura que a deformação plástica aplica, os eixos de fácil magnetização distanciam-se da orientação à direção da tensão aplicada, levando assim a uma diminuição do sinal de RMB (28).

2.5 MÉTODO DO FURO CEGO

O método de furo cego (MFC) originalmente foi desenvolvido através de uso de extensômetros mecânicos que medem os deslocamentos em torno de um furo passante, realizado em uma placa com tensão. O método creditado ao pesquisador Josef Mathar, em seu artigo pioneiro, publicado após o seu falecimento, obteve grande relevância visto que, inúmeros estudos sucederam utilizando essa técnica experimental para a análise de tensões residuais (3).

Os trabalhos subsequentes aperfeiçoaram a técnica e trouxeram novas configurações, como por exemplo na impossibilidade de realização de um furo passantes, o furo cego pode ser realizado da forma como ilustrada pela Figura 10.

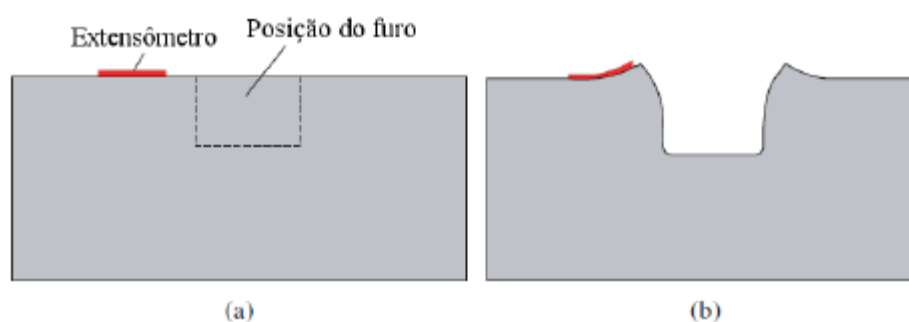


Figura 10 – Esquemático da seção transversal de um furo submetido a um estado de tensões, (a) sem a presença do furo e (b) após a usinagem do furo cego (3)

Posteriormente, em 1950 houve o aperfeiçoamento da precisão de medição utilizando extensômetros de resistência elétrica, ao invés de extensômetros mecânicos. Além disso, os primeiros estudos sobre o desenvolvimento da técnica concentram-se na medição de placas com

espessuras finas e assumindo tensão residual distribuída uniformemente ao longo da espessura. Sendo, a derivação para componentes mais espessos desenvolvidas posteriormente (3).

Recentemente, os estudos concentram-se na medição de tensões não uniformes com a profundidade, através da técnica de incrementação e o desenvolvimento de soluções para esses campos. A evolução da simulação numérica e técnicas computacionais, possibilitaram o desenvolvimento de cálculos de tensão residual que não eram possíveis anteriormente, em 1981, foi desenvolvida uma solução da técnica incremental de medição através de simulações em elementos finitos, incluindo o tabelamento de calibrações. Em 1988, foi desenvolvida a tabela de calibração utilizada pela norma ATM E837.13a (3).

Com o desenvolvimento de rosetas com seis extensômetros, houve a possibilidade da ampliação da precisão e a versatilidade da técnica, já que foi apresentado um aumento na sensibilidade de medição, em virtude de uma maior área de medição das deformações ao redor da usinagem do furo.

Sendo considerado o método mais comum de análise das tensões residuais, o MFC usando rosetas é padronizado pela ASTM. Durante, as últimas seis décadas, diferentes abordagens têm sido exploradas na leitura das deformações em superfícies, como por exemplo métodos ópticos no lugar de extensômetros.

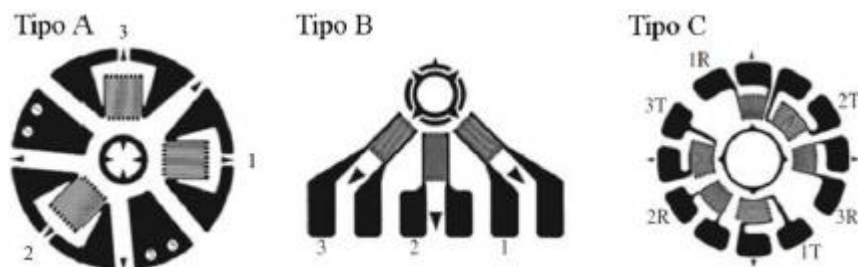


Figura 11 – Tipos de extensômetros (3)

As medições por métodos ópticos apresentam simultaneamente uma oportunidade e um desafio, devido a sua grande quantidade de dados medidos, através de movimentação de *pixels*. A Figura 12, apresenta um comparativo entre as técnicas ópticas, Eletronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), e a de utilização de rosetas (29).

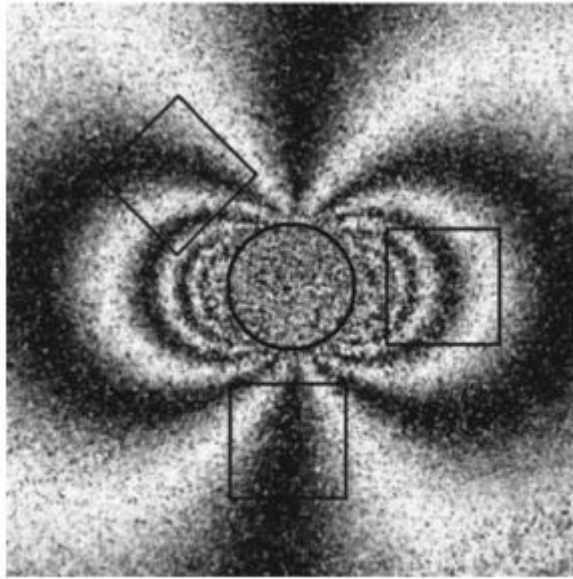


Figura 12 – Comparação entre a quantidade de dados apresentados pela medição óptica e por extensômetros, representados pelos quadrados.

Tabela 4 – Comparação entre as técnicas Ópticas e com Extensômetro para o ensaio de furo cego (29)

Medição com Extensômetros	Medição Óptica
Custo moderado com equipamentos e alto custo por medição	Custo elevado do equipamento e custo moderado por medição
Tempo de preparação e medição elevados	Tempo de preparação e medição reduzido
Reduzido número de dados precisos e confiáveis	Elevado número de dados precisos e redundantes que podem ser estaticamente tratados
Cálculo de tensões relativamente compactos	Algoritmo complexo
Capacidade modesta para obtenção de dados	Recursos extensivos para obtenção de dados
Relativamente robusto, adequado para utilização em campo	Menos robusto e mais adequado para utilização em laboratório
Mais sensível a erros de excentricidade	Sensível a erros de excentricidade maiores que 0,05mm

Observa-se que há vantagens e desvantagem em ambas as técnicas, que devem ser analisadas para cada situação de aplicação.

2.5.1 Sensibilidade do Método do furo Cego

A sensibilidade do método de furo cego tende a diminuir progressivamente com o aumento da profundidade de furação. Sendo isso, reflexo do fato de que com o aumento da profundidade, as deformações oriundas da remoção de material se localizam mais distante da superfície do material, onde estão localizados os extensômetros, a Figura 13 apresenta um esquemático dessa variação (29).

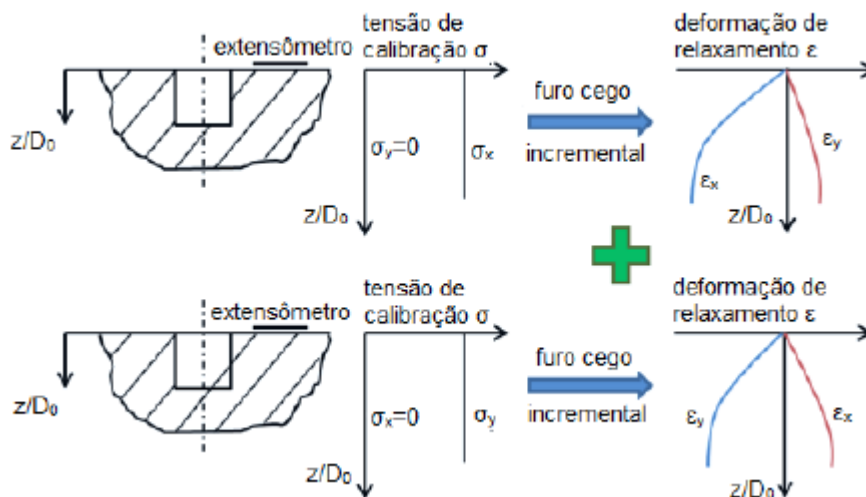


Figura 13 – Esquemático do efeito da profundidade na deformação no método do furo cego (29).

2.5.2 Ensaios Preliminares Sobre o Material Utilizado

Esta seção se destina a demonstrar os dados apresentados em reunião realizada no dia 13 de outubro de 2021, às 13h, pelos pesquisadores Jorge Luis Cardoso, Rodrigo Carvalho Paes Loureiro e Pedro Henrique Pinheiro Lima, orientados pelo professor Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, da Universidade Federal do Ceará, para o projeto Avaliação da distribuição de orientação dos grãos e da classificação das suas fronteiras nas propriedades mecânicas e na sensibilidade a corrosão sob tensão em aços utilizados nas armaduras de tração e pressão de dutos flexíveis. A composição química dessa amostra é apresentada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Composição química do aço estudado (30)

Elemento	Teor em massa (%)
C	0,73
Si	0,26
Mn	0,58
P	0,0004
S	0,004
Ni	0,019
Cr	0,018
Mo	0,003
Al	0033
V	0,001
Ti	0,002

*Resultados expressos em ppm com seus respectivos desvios padrão

Além disso, foi apresentado que a microestrutura é característica de um aço perlítico e devido ao processo de fabricação utilizado apresenta variação de textura, devido ao tratamento térmico de patenteamento e a conformação mecânica de dobramento (30) (31).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais avaliados neste trabalho, e descreve os tratamentos térmicos e as técnicas de ensaio que foram empregadas nos experimentos, conforme a seguir

3.1 MATERIAIS

A partir dos arames, foram cortados corpos de provas de tamanho 55 mm de comprimento, 12 mm de largura e 6 mm de espessura, para facilitar a análise nos equipamentos. A Figura 14 apresenta o corpo de prova como recebido.

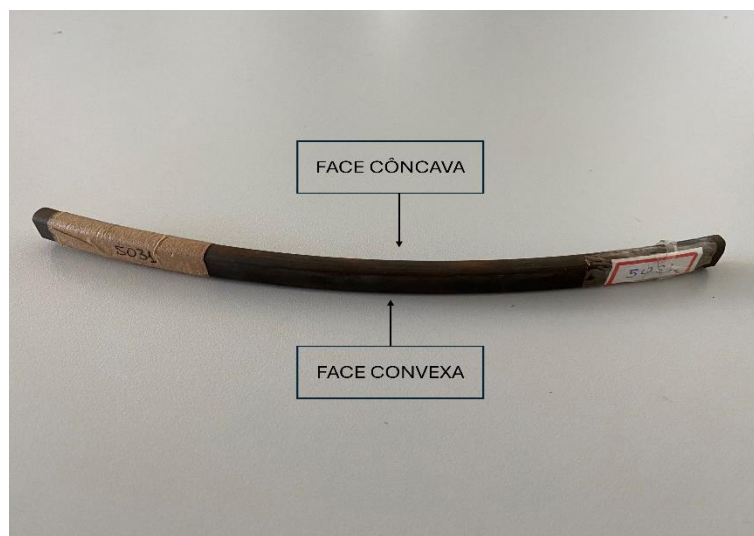


Figura 14 – Corpo de prova como recebido



Figura 15 – Representação das direções de análise da amostra

3.2 TÉCNICAS DE ENSAIO

Esta seção apresenta as técnicas de ensaio que foram empregadas neste trabalho.

3.2.1 Ensaio de Ruído magnético de Barkhausen

Os ensaios de ruído magnético de Barkhausen foram realizados no material de forma rotacional, com ângulo de variação de 15 graus, com o objetivo analisar a variação das propriedades magnéticas do material em relação a variação do campo de tensões residuais. Estes ensaios foram conduzidos no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LABENDEM) do Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento (CIPID), no Estado do Espírito Santo, através do sensor S1-14-13-21, da empresa StressTech e no equipamento Rollscan 350. A Figura 16 apresenta o Equipamento de ensaio de Ruído Magnético de Barkhausen, e a Figura 17 apresenta o sensor utilizado.



Figura 16 – Equipamento Rollscan 350, utilizado para os ensaios



Figura 17 – Sensor utilizado para o ensaio no equipamento Rollscan 350



Figura 18 – Suporte com variação de 15° para os ensaios magnéticos

A Figura 18, apresenta o suporte desenvolvido pelo autor em impressão 3D, objetivando facilitar a rotação da amostra durante o ensaio de Ruído Magnético de Barkhausen.

Foram realizados ensaios com duas frequências diferentes, sendo elas, 50 Hz e 125 Hz, buscando uma análise em diferentes profundidades do material, sendo que a frequência saturação magnética máxima para esse material é atingida em 340 Hz.

3.2.2 Ensaio de Furo Cego

Os ensaios nas amostras foram realizados com um furo de 0,8 milímetros de diâmetro e variação de profundidade de 0,05 milímetros até o 0,4 milímetros, sendo realizadas incrementações para essa variação. Ainda, foi adotada a velocidade de rotação de 2500 rotações por minuto (rpm).

Os parâmetros adotados para os ensaios são recomendados pelo manual do equipamento PRISM, da fabricante Stresstech, a Figura 19 apresenta o equipamento utilizado (32).

É válido ressaltar que a variação de amostras não buscou trazer repetitividade para os ensaios de tensão residual. O seu comportamento foi utilizado para comparação com o comportamento do envelope do ruído magnético de *Barkhausen*.



Figura 19 – Equipamento Prims da Stresstech, utilizado para o ensaio de Furo Cego

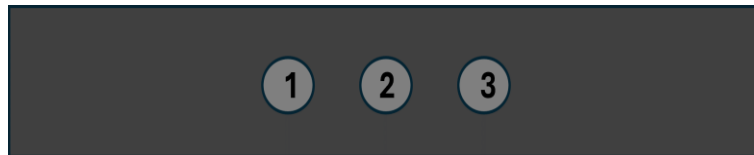


Figura 20 – Esquemático das regiões de furação, onde o primeiro furo é referente a direção de 45 graus da transversal do dobramento, o segundo furo a direção transversal de dobramento e o terceiro a direção de dobramento

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 ENSAIO DE FURO CEGO

Esta seção será destinada a análise da variação das tensões residuais apresentadas pelas três amostras ensaiadas do material estudado, em três direções diferentes, sendo elas transversal ao dobramento, 45 graus da transversal do dobramento e a direção de dobramento, nas duas faces das amostras, côncava e convexa.

As Figura 21 a Figura 26 apresentam os resultados obtidos pelo método de furo cego nas três amostras analisadas, vale ressaltar que essas análises não buscaram desenvolver uma repetitividade estatística do comportamento das tensões residuais na amostra. Contudo, na seção 4.2.2 estes resultados serão utilizados para realizar a comparação com o comportamento do envelope do ruído magnético de *Barkhausen*.

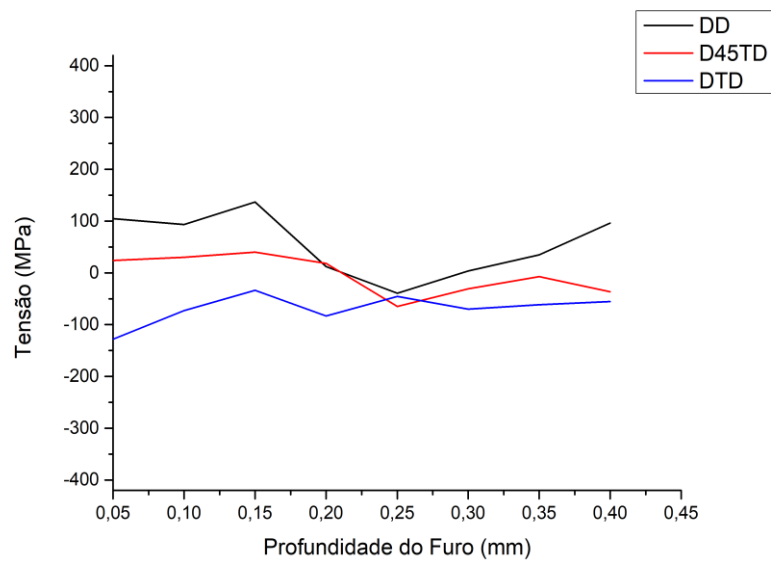


Figura 21 – Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 1, lado convexo

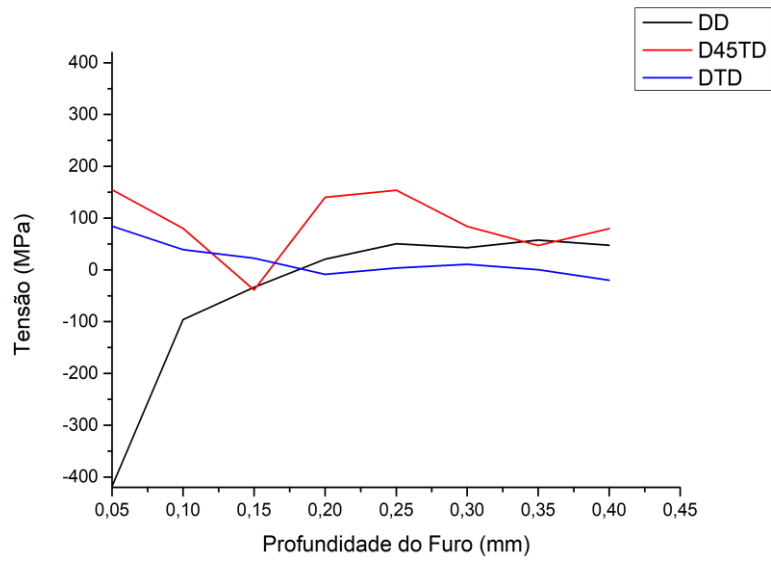


Figura 22 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 1, lado côncavo

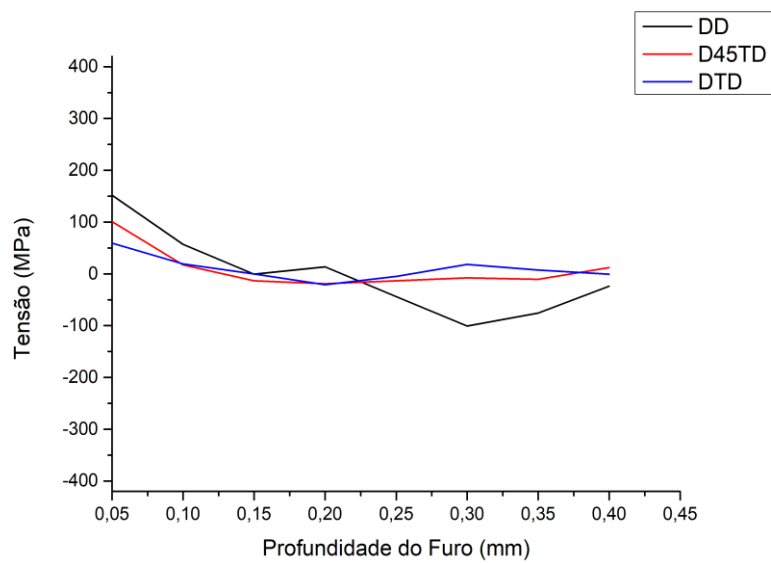


Figura 23 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 2, lado convexo

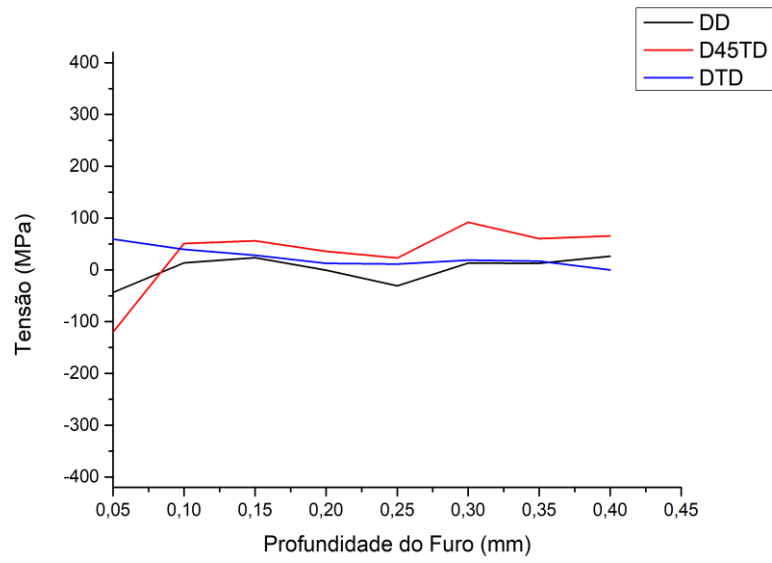


Figura 24 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 2, lado côncavo

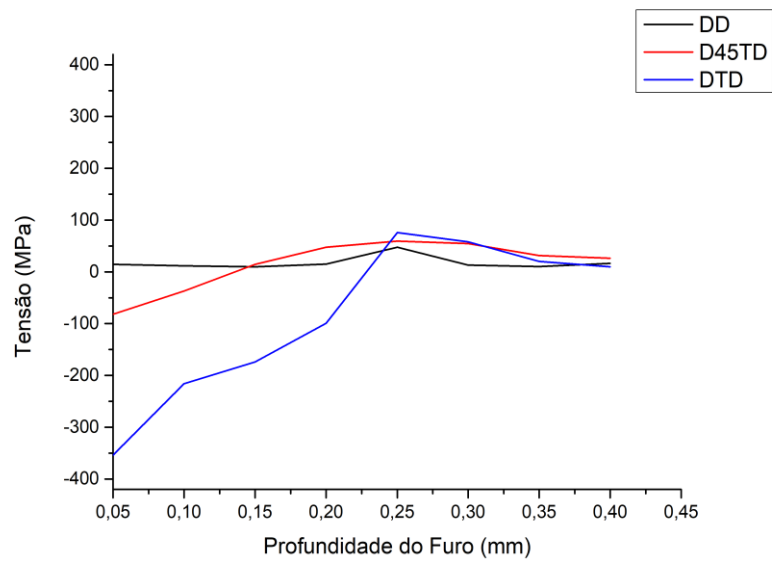


Figura 25 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 3, lado convexo

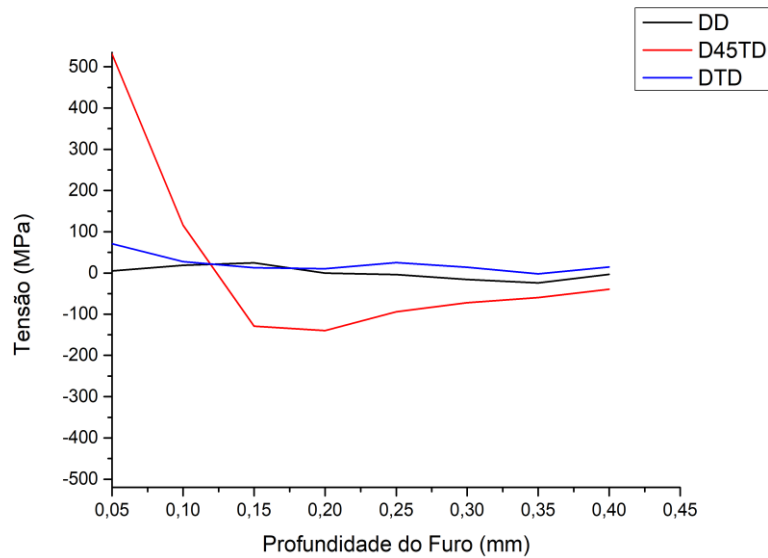


Figura 26 - Resultado do ensaio de Furo Cego para a Amostra 3, lado côncavo

Observa-se pela análise dos gráficos apresentados nas Figura 21 a Figura 26, que há uma variação de tensões residuais nas faces das amostras e que seguem um comportamento similar, sendo que na face convexa a direção de dobramento para as três amostras apresentou um comportamento mais trativo nas primeiras furações, tendendo a zero na sequência da última furação, a direção transversal do dobramento apresentou uma tendência compressiva nas primeiras furações e também tende a tensão zero na sequência para a última furação. Já a direção de 45 graus da transversal do dobramento apresentou um comportamento de variação entre tensões positivas e negativas (33).

Para a face côncava a tendência para as três amostras foi a inversa apresentada pela face convexa, comportamento esperado e já apresentado em outros trabalhos.

Além disso, observa-se também que na face concava e convexa da amostra 3 e na face concava da amostra 1 o primeiro furo apresenta um valor disruptivo com os demais, que pode indicar um erro embutido através do método do ensaio, pois já foi indicado em estudo que o primeiro furo realizado nas amostras pode conter maiores erros de medição.

4.2 RUÍDO MAGNÉTICO DE BARKHAUSEN

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes ao ensaio de ruído magnético de *Barkhausen*, assim como o do fluxo magnético aplicado ao material. Os resultados foram obtidos através do processamento no *Software* Microscan, desenvolvido pela empresa *StressTech*. As figuras, referentes ao rotacional dos resultados, foram processadas no *Software* Oringin, objetivando uma melhor observação gráfica dos resultados e do perfil magnético apresentado pelas amostras.

4.2.1 Rotacional do RMS

O valor obtido do *RMS*, como já mencionado anteriormente, na revisão bibliográfica deste texto, é obtido através da média quadrática de todos os valores do Ruído Magnético de *Barkhausen* e se apresenta como adimensional. As figuras Figura 27 a Figura 32, apresentam os resultados do rotacional do *RMS* do Ruído Magnético de *Barkhausen*, para os três corpos de prova ensaiados, sendo que eles foram realizados nos dois lados do arame, sendo uma face convexa e a outra a face côncava. O valor do zero grau do rotacional é referente ao sentido transversal ao dobramento do arame.

Estudos indicam que para efeitos de deformação elástica em aços aplicados em dutos flexíveis e em chapas de aço, quando há a presença de tensões trativas se gera um eixo magnético facilitador para a direção da tensão aplicada. Consequentemente, para a aplicação de tensões compressivas é apresentado o comportamento inverso para as tensões trativas, sendo gerado um eixo magnético facilitador na direção transversal a aplicação da tensão (34) (35).

No entanto, trabalhos dissertam que para deformações plásticas há uma tendência de ser apresentada uma redução da energia do Ruído Magnético de *Barkhausen* e do *RMS* do *RMB*, com o aumento das deformações plásticas (36).

Observa-se pela análise das Figura 27 e Figura 28 que há uma diferença no comportamento do *RMS* para os dois lados da amostra 1, no entanto para as duas frequências há uma tendência do mesmo comportamento do rotacional para cada face da amostra.

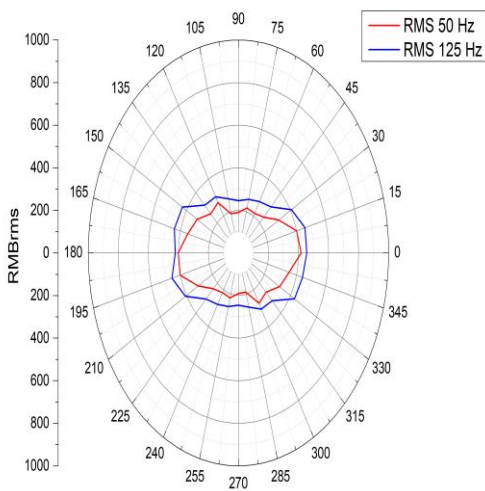


Figura 27 – Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 1, lado convexo

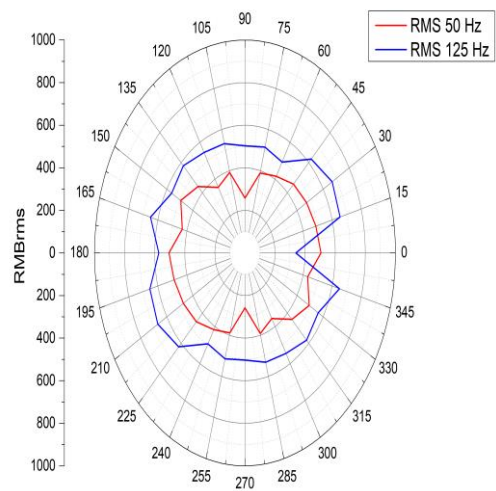


Figura 28 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 1, lado côncavo

As Figura 29 e Figura 30 apresentam o mesmo comportamento do RMS, para a amostra 2, para os dois lados que foram apresentados pela amostra 1.

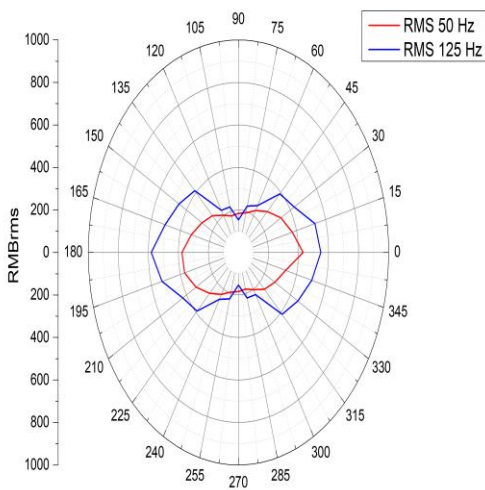


Figura 29 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 2, lado convexo

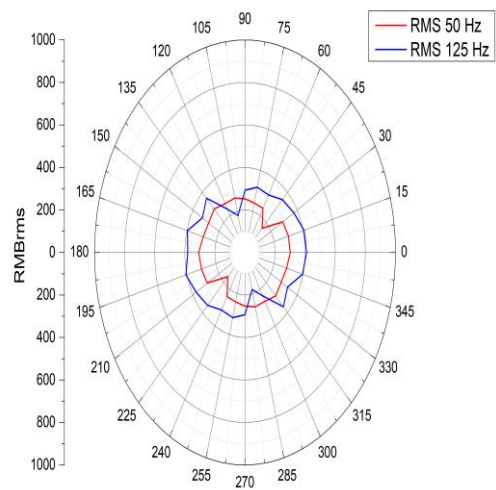


Figura 30 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 2, lado côncavo

Para a amostra 3, Figura 31 e Figura 32, observa-se um comportamento parecido com as amostras apresentadas anteriormente.

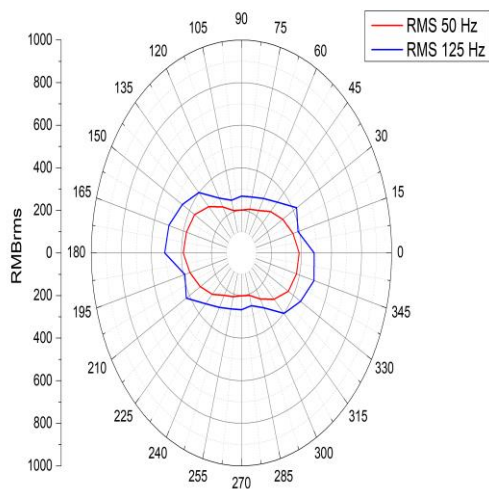


Figura 31 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 3, lado convexo

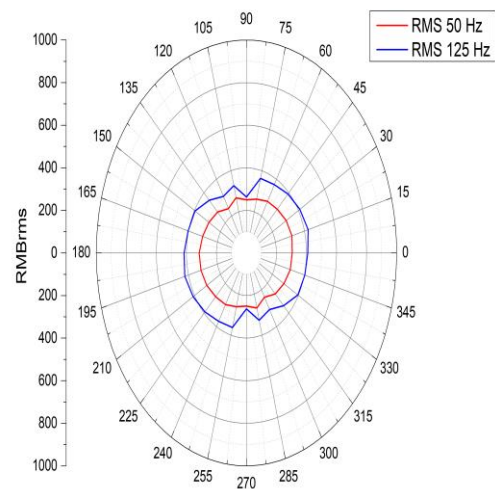


Figura 32 - Resultado do rotacional do RMS para a Amostra 3, lado côncavo

Estudos apontam que para análise de materiais que apresentaram anisotropia cristalina, como o caso do material utilizado neste texto, o valor de RMS e energia do Ruído Magnético de *Barkhausen* está mais associado ao perfil cristalográfico, do que diretamente com as variações de tensões residuais (41) (42) (43). Logo, esse comportamento do RMS indica que há a presença de uma variação da anisotropia magnética entre as faces do material estudado.

4.2.2 Envelope do Ruído Magnético de *Barkhausen*

Esta seção é destinada a apresentação da discussão dos resultados referentes ao envelope do Ruído Magnético de *Barkhausen* para as três amostras analisadas ao decorrer deste relatório, assim como reservada as direções de dobramento, transversal ao dobramento e 45° da transversal do dobramento. Para a obtenção do envelope do ruído magnético de *Barkhausen* foi utilizada a função Envelope do programa *OringinPro 9.0*, com ajuste da suavização da curva.

A anisotropia magnética se caracteriza pela diferença na energia de magnetização em diferentes direções de um material, sendo ela uma propriedade comum em materiais ferromagnéticos. Essa anisotropia pode ser gerada a partir da estrutura atômica, anisotropia magnetocristalina, e por tensões aplicadas no material ou residuais, anisotropia magnetoelástica (44) (45).

Estudos correlacionam os sinais do ruído magnético de *Barkhausen* da região que engloba o sentido da curva da saturação para a remanescência da histerese magnética, primeiro quadrante do eixo cartesiano, sendo eles os menores saltos do pico referentes a rotação

irreversível das paredes dos domínios, com a energia referente a anisotropia magnetocristalina, logo, está associada à estrutura cristalina do material (22) (46).

Dessa forma, para direcionar o estudo para a correlação das tensões residuais apresentadas nas amostras, buscou-se realizar essa primeira análise do comportamento da curva do envelope na região da curva de histerese magnética da saturação para a remanescência. As Figura 33 a Figura 36 apresentam a combinação do envelope do RMB com a histerese magnética para a amostra 1, os outros ensaios se encontram no em anexo na seção 6.

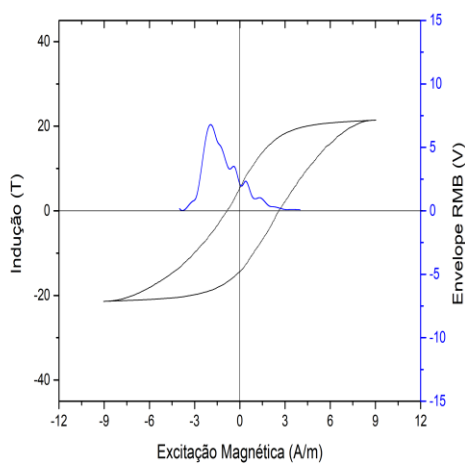


Figura 33 – Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

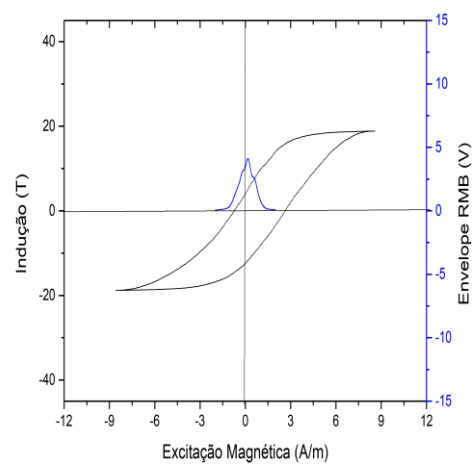


Figura 34 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

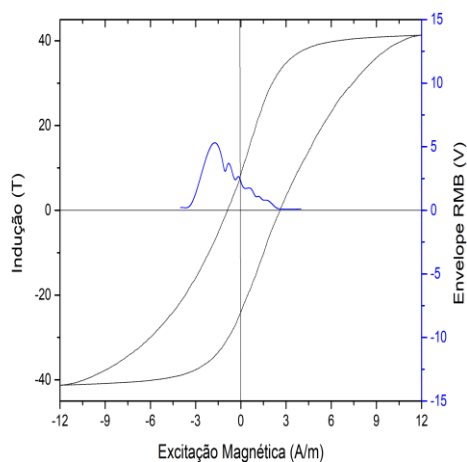


Figura 35 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

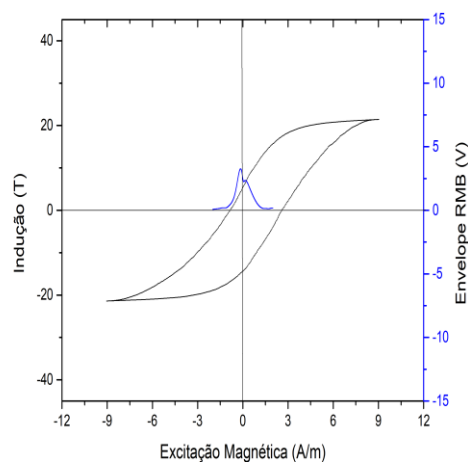


Figura 36 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

É possível observar através dos resultados, que para os ensaios realizados com as frequências de 125Hz, o ajuste da curva do envelope foi melhor em relação ao de frequência de 50 Hz. Contudo, de acordo com a literatura a região que é caracterizada pela anisotropia magnetocristalina é a do primeiro quadrante do eixo cartesiano, além disso até o primeiro pico de maior intensidade da distribuição do envelope do ruído magnético de *barkhausen*, o qual é caracterizado pelo ponto de indicação da rotação de 180° das paredes dos domínios magnéticos (22).

Tanto para a face convexa quanto para a côncava, o aumento da frequência produz uma redução da amplitude máxima, ou seja, da altura do pico. Observa-se também que para os ensaios realizados com a frequência de 50Hz as curvas do envelope, para todas as amostras e condições, são deslocadas para a esquerda do gráfico, quando comparados com os ensaios realizados com a frequência de 125 Hz, o que pode indicar que para frequências menores a representatividade dos resultados pode ser mais característica da influência da anisotropia cristalina presente no material de análise. Na literatura observa-se que já foi abordada a utilização de frequência baixas, na ordem de 1 Hz, para a estimação da energia da anisotropia magnetocristalina por ruído magnético de *Barkhausen* (46).

As Figura 37 a Figura 48, apresentam a comparação entre os envelopes para as direções transversal de dobramento, 45° da transversal de dobramento e para a direção de dobramento, das amostras, além disso, para as duas faces de análise. Ainda, os maiores picos estão

sinalizados por setas nas figuras, pois a análise para as tensões residuais será focalizada para a direção após eles, já que anteriormente, neste texto, foi exposto que a região do início da curva do envelope até o primeiro maior pico é mais característica do efeito da anisotropia cristalina.

Ao realizar a comparação do comportamento da curva de envelope, referente as mesmas condições da amostra, Figura 37 e Figura 38, Figura 39 e Figura 40, Figura 41 e Figura 42, Figura 43e Figura 44, Figura 45 e Figura 46, e ainda, a Figura 47 e Figura 48, porém para as diferentes frequências de análise, observa-se que para a frequência de 50 Hz há um deslocamento para a esquerda de todas as curvas de envelope para as três direções de análise. Contudo, para a frequência de 125 Hz há um deslocamento menor das curvas de envelope.

A seguir, serão comparados os resultados obtidos para as tensões residuais e o envelope do ruído magnético para as direções de dobramento, 45° da transversal de dobramento e da transversal de dobramento. Para as análises da frequência de 50 Hz, será utilizada a menor profundidade de pele apresentada na Tabela 3, 0,3mm e para a frequência de 125Hz será utilizada a profundidade de pele de 0,2 mm.

Para a face convexa da amostra 1, foram obtidas as tensões residuais de 3,75 MPa, para a direção de dobramento, -30,70 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de - 69,90 MPa para a direção transversal de dobramento, sendo a profundidade de 0,3 mm. Para a profundidade de 0,2 mm, foram obtidas as tensões residuais de 12,40 MPa, para a direção de dobramento, 18,6 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de -83,2 MPa para a direção transversal de dobramento. Quando comparadas com as Figura 37 e Figura 38, observa-se que a tendência do envelope é a inversa da apresentada pela literatura, onde para tensões compressivas haveria uma redução do valor do pico do envelope, as curvas se deslocariam para a direita. Contudo, há de se considerar a existência da anisotropia cristalina, que como apresentada na seção 4.2.1, há uma facilidade de magnetização na direção transversal de dobramento, o que influencia diretamente no perfil da curva de envelope.

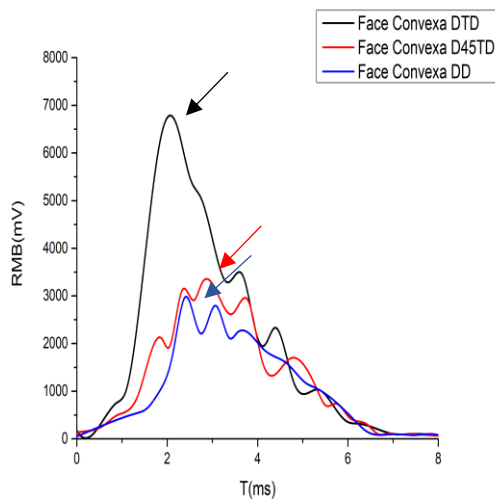


Figura 37 – Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz

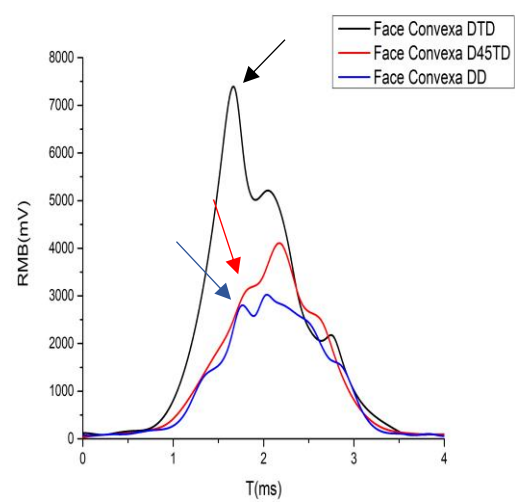


Figura 38 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz

Para a face convexa da amostra 2, foram obtidas as tensões residuais de -101,00 MPa, para a direção de dobramento, -7,55 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de 18,30 MPa para a direção transversal de dobramento, sendo a profundidade de 0,3 mm. Para a profundidade de 0,2 mm, foram obtidas as tensões residuais de 13,90 MPa, para a direção de dobramento, -18,80 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de -20,60 MPa para a direção transversal de dobramento. Quando comparados os resultados com as Figura 39 e Figura 40, observa-se que o comportamento das curvas se assemelha com o da amostra 1, logo, há indícios de que é caracterizada pela anisotropia cristalina.

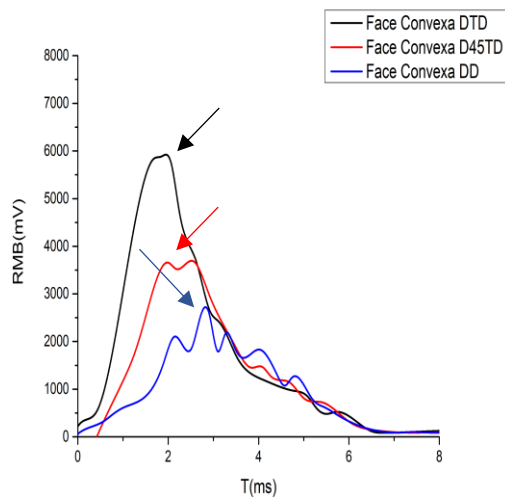


Figura 39 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz

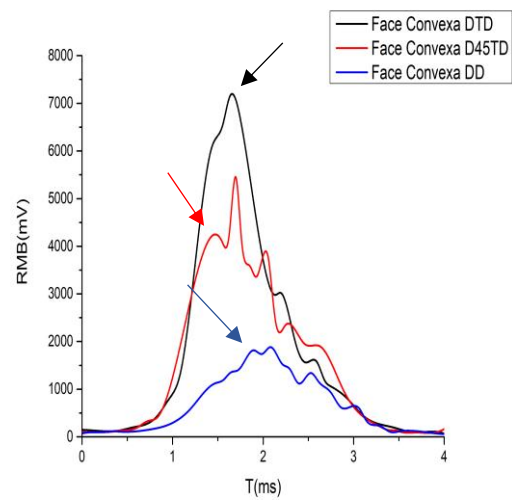


Figura 40 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz

Para a face convexa da amostra 3, foram obtidas as tensões residuais de 13,00 MPa, para a direção de dobramento, 54,70 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de 58,00 MPa para a direção transversal de dobramento, sendo a profundidade de 0,3 mm. Para a profundidade de 0,2 mm, foram obtidas as tensões residuais de 15,10 MPa, para a direção de dobramento, 47,7 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de -99,30 MPa para a direção transversal de dobramento. Quando comparados os resultados com as Figura 41 e Figura 42, observa-se que o comportamento das curvas se assemelha com o da amostra 1, logo, há indícios de que é caracterizada pela anisotropia cristalina.

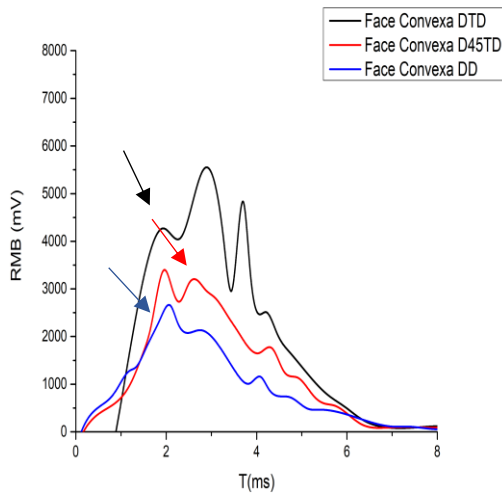


Figura 41 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz

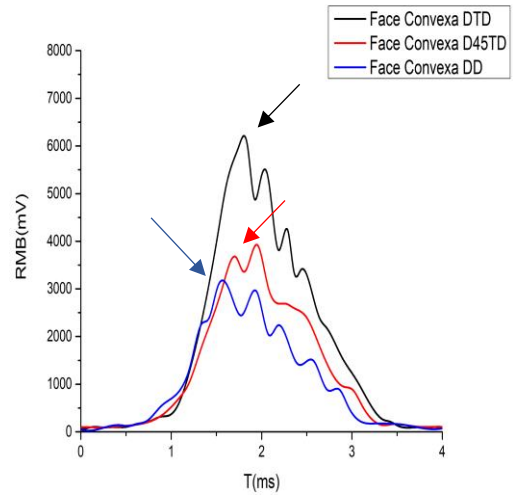


Figura 42 - Comparação do envelope do RMB, para a face convexa, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz

Para a face côncava da amostra 1, foram obtidas as tensões residuais 42,80 MPa, para a direção de dobramento, 83,90 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de 11,00 MPa para a direção transversal de dobramento, sendo a profundidade de 0,3 mm. Para a profundidade de 0,2 mm, foram obtidas as tensões residuais de 20,90 MPa, para a direção de dobramento, 140,00 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de -8,73 MPa para a direção transversal de dobramento. Quando comparados os resultados com as Figura 43 e Figura 44, observa-se que o comportamento da curva de 125 Hz se aproxima do comportamento esperado para o envelope do RMB para a variação de tensões.

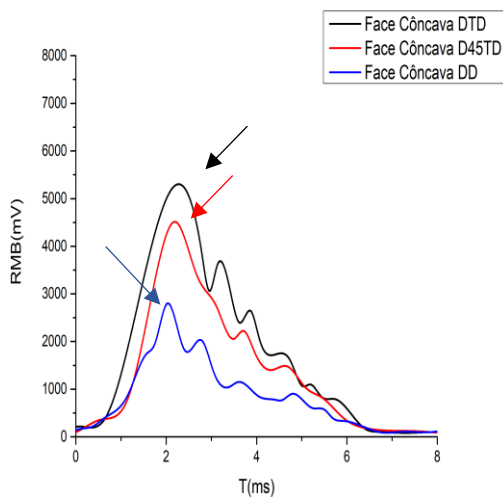


Figura 43 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz

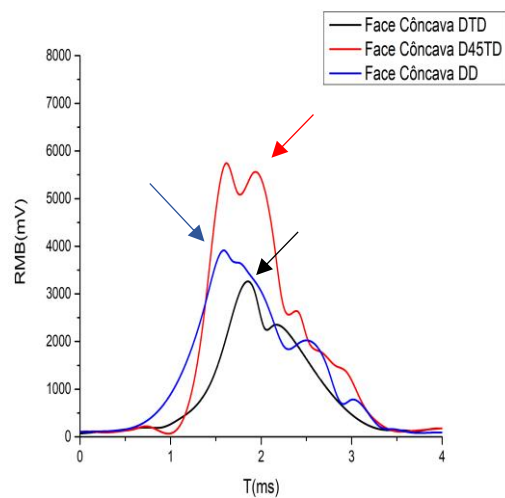


Figura 44 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 1 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz

Para a face côncava da amostra 2, foram obtidas as tensões residuais 13,20 MPa, para a direção de dobramento, 92,00 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de 18,90 MPa para a direção transversal de dobramento, sendo a profundidade de 0,3 mm. Para a profundidade de 0,2 mm, foram obtidas as tensões residuais de -0,57 MPa, para a direção de dobramento, 36,00 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de 12,80 MPa para a direção transversal de dobramento. Quando comparados os resultados com as Figura 45 e Figura 46, observa-se que o comportamento da curva de 125 Hz se aproxima do comportamento esperado para o envelope do RMB para a variação de tensões residuais.

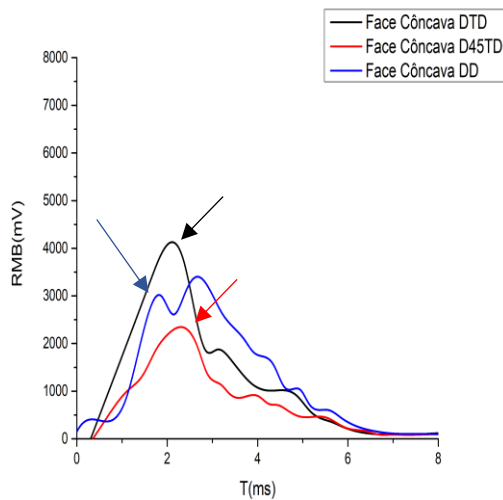


Figura 45 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz

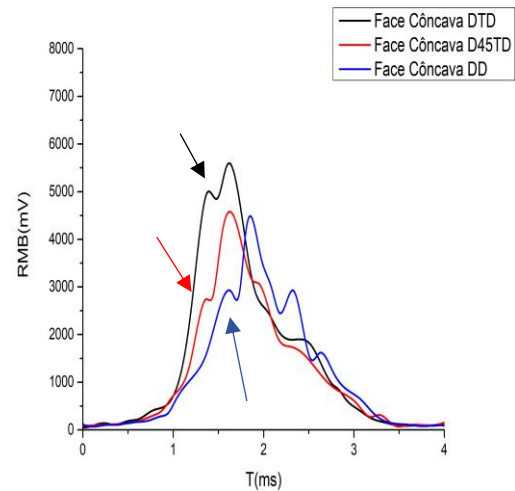


Figura 46 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 2 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz

Para a face côncava da amostra 3, foram obtidas as tensões residuais -15,40 MPa, para a direção de dobramento, -72,20 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de 13,90 MPa para a direção transversal de dobramento, sendo a profundidade de 0,3 mm. Para a profundidade de 0,2 mm, foram obtidas as tensões residuais de -0,03 MPa, para a direção de dobramento, -140,00 MPa para a direção de 45° da transversal do dobramento e de 10,60 MPa para a direção transversal de dobramento. Quando comparados os resultados com as Figura 47 e Figura 48, observa-se que o comportamento das duas curvas não se assemelha com o comportamento esperado pela literatura.

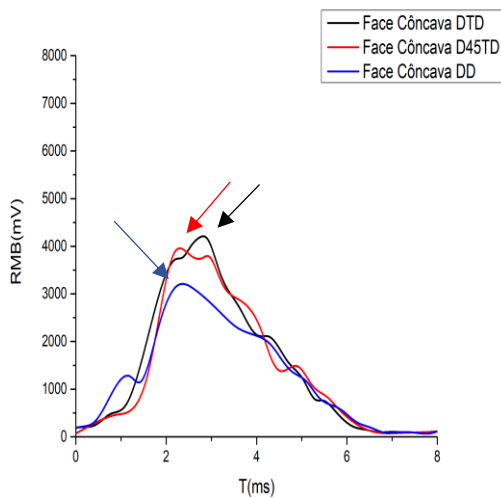


Figura 47 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 50 Hz

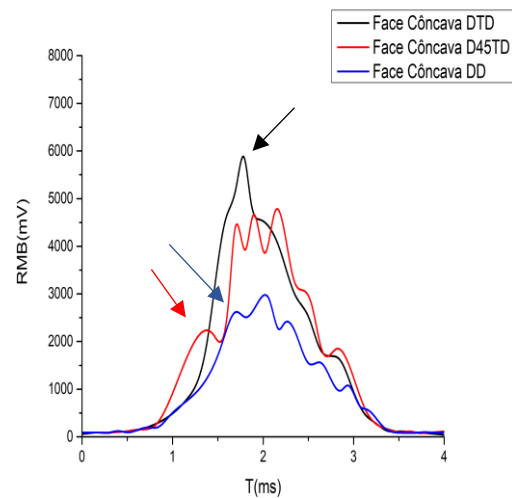


Figura 48 - Comparação do envelope do RMB, para a face côncava, da amostra 3 nas diferentes direções analisadas para a frequência de 125 Hz

Vale ressaltar que mesmo que haja a presença de curvas que se assemelham com o comportamento esperado com a literatura, quando comparadas com as tensões residuais, nesse caso seria mais prudente comparar com a tendência do gradiente das tensões residuais para as direções em suas diferentes faces, já que existe uma influência grande da anisotropia cristalina no comportamento do Ruído Magnético de *Barkhausen*, para as frequências de análise. As divergências com o esperado pela literatura podem vir da variação da estrutura cristalina, erros na aquisição de dados e utilização de frequências baixas de análise, que aumentam a profundidade de análise e conseqüentemente são mais influenciadas pelo gradiente de tensões na amostra e pelas direções cristalográficas, além de poder sofrer influência de diversas propriedades mecânicas não avaliadas neste texto.

No entanto, há na literatura um estudo que indica que na presença de anisotropia cristalina e tensões residuais em uma amostra, há uma dificuldade de se separar a influência direta de cada um no comportamento do envelope do *RMB*, pois a presença dos dois fatores influencia de forma simultânea o comportamento do envelope do *RMB* (47) (48) (49) (50).

5 CONCLUSÕES

- Com a análise do furo cego observa-se que o arame estudado apresenta uma variação considerável de tensões entre a superfície da amostra e o seu interior.
- As tensões residuais apresentaram um comportamento esperado pela literatura, quando comparadas as duas faces das amostras.
- As tensões residuais nas amostras apresentaram valores diferentes, mas seguiram uma tendência parecida.
- A análise do rotacional do sinal do RMS se apresentou como característica para a análise da anisotropia cristalina do material.
- A análise do envelope do ruído magnético de *Barkhausen* apresentou melhores repetições de resultados comparando as amostras analisadas para a frequência de 125Hz, no entanto não foi possível desenvolver uma correlação exata sobre o efeito das tensões residuais no envelope.
- O envelope para a frequência de 125 Hz se apresentou com picos mais definidos e a curva do gráfico se apresentou de forma menos ruidosa, quando comparado com o envelope apresentado para a frequência de 50 Hz.
- Para o material, que apresenta tanto uma anisotropia cristalina como tensões residuais a utilização de frequências baixas de análise do ruído magnético de *Barkhausen* os resultados obtidos são mais característicos em relação a anisotropia cristalina, pois principalmente a profundidade de análise pode interferir na compreensão dos dados.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise de tensão por Raio-X.
- Implementação de tratamentos térmicos e análise do comportamento.
- Incluir variação dos parâmetros do processo de laminação.
- Variação de processos de tratamento térmico.

6 ANEXOS

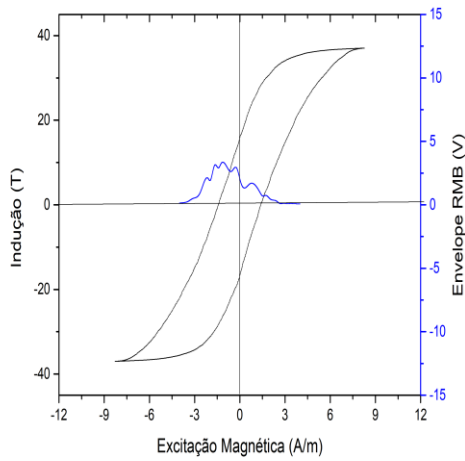


Figura 49 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

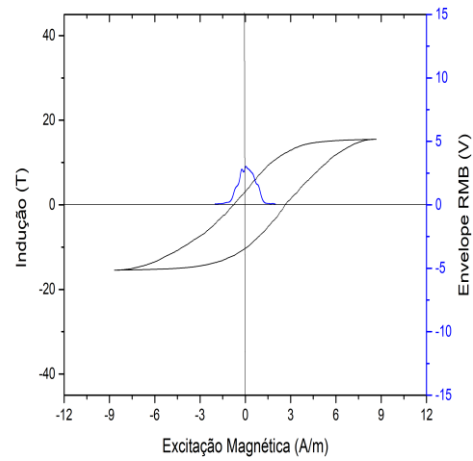


Figura 50 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

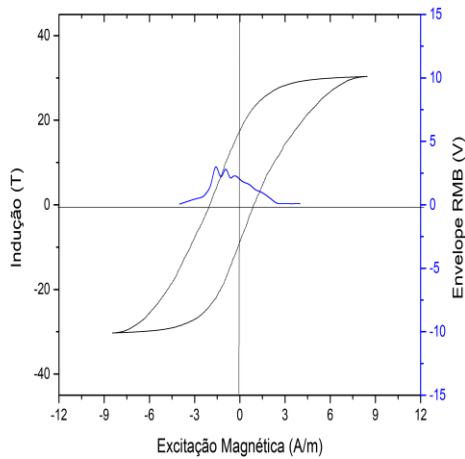


Figura 51 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz

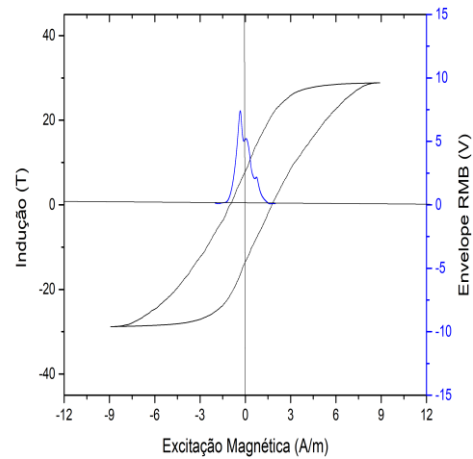


Figura 52 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz

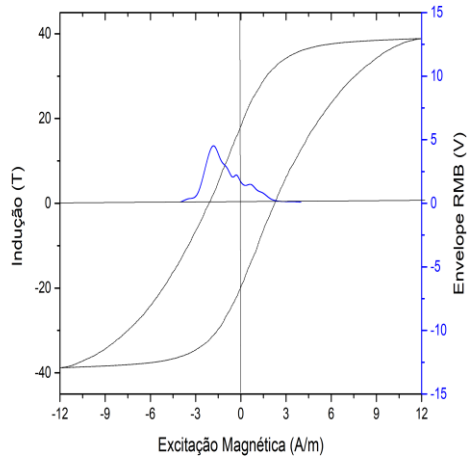


Figura 53 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

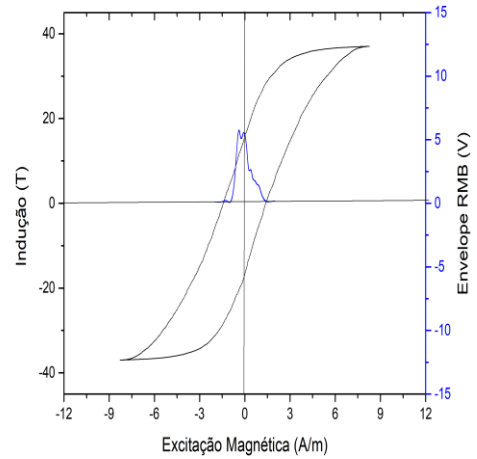


Figura 54 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

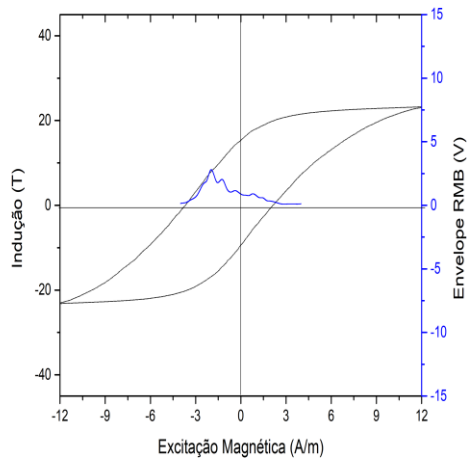


Figura 55 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz

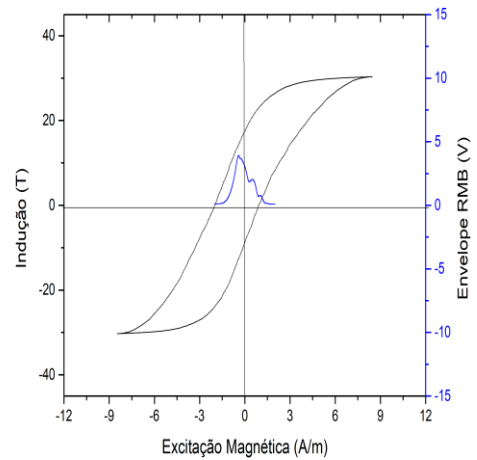


Figura 56 - Envelope do ruído magnético da amostra 1, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz

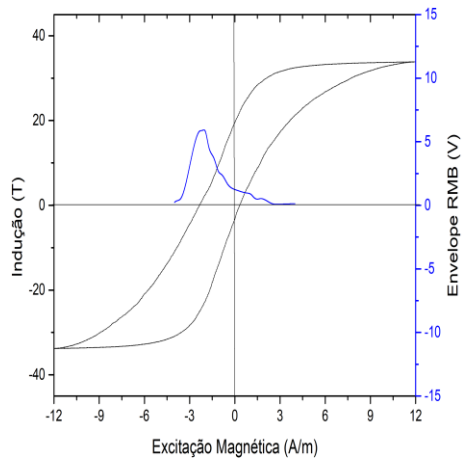


Figura 57 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

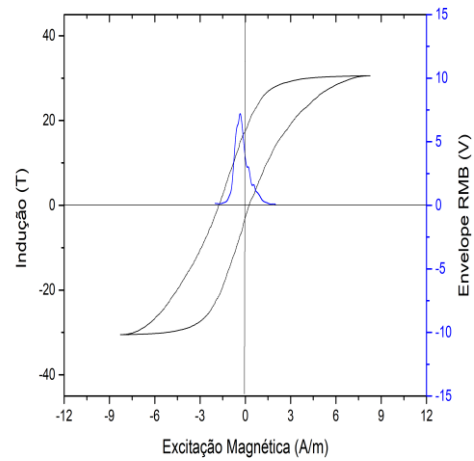


Figura 58 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

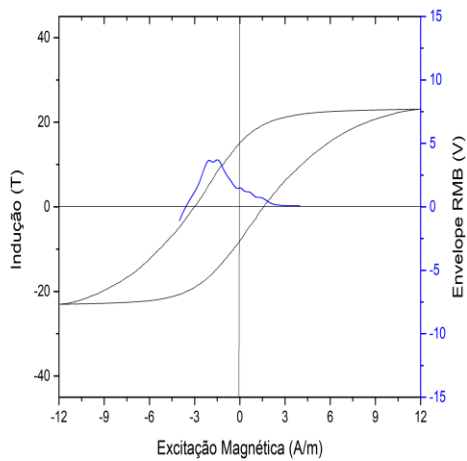


Figura 59 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

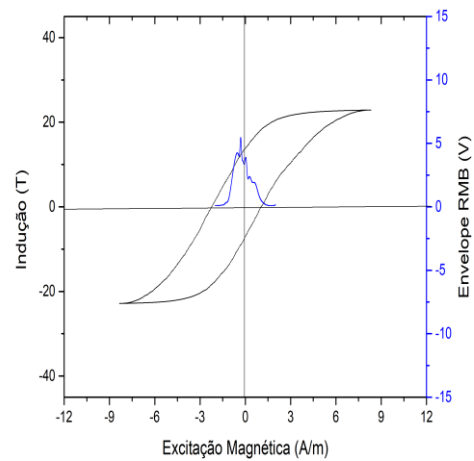


Figura 60 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

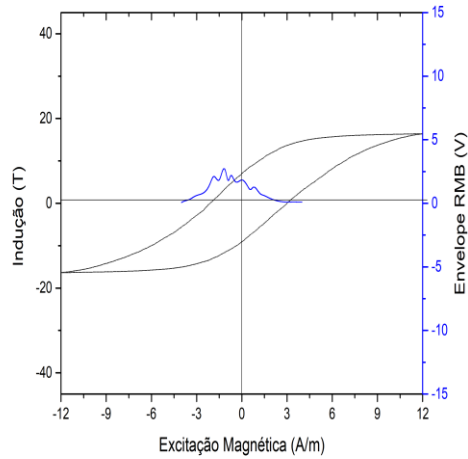


Figura 61 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz

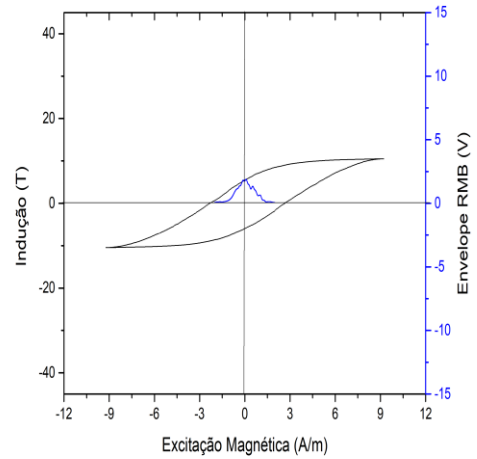


Figura 62 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz

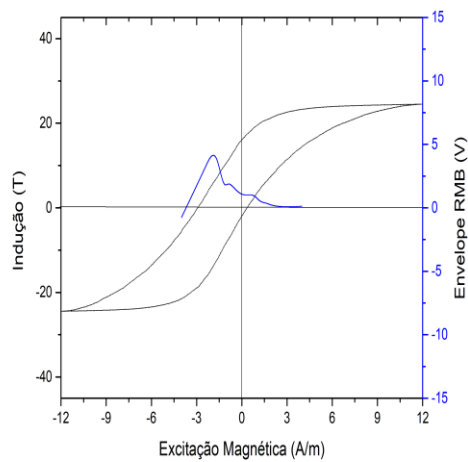


Figura 63 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

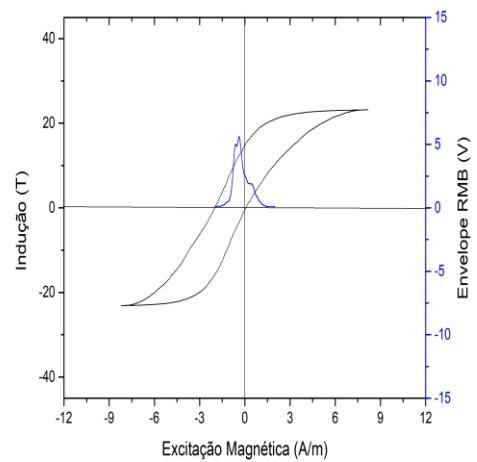


Figura 64 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

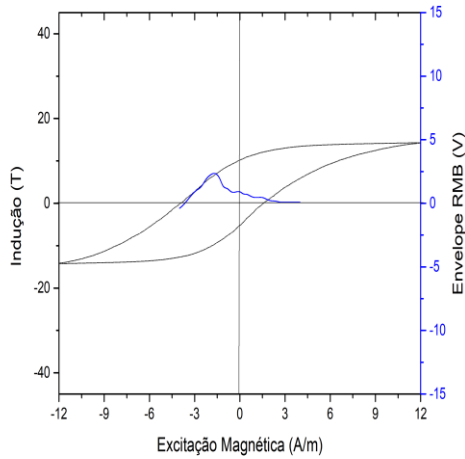


Figura 65 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

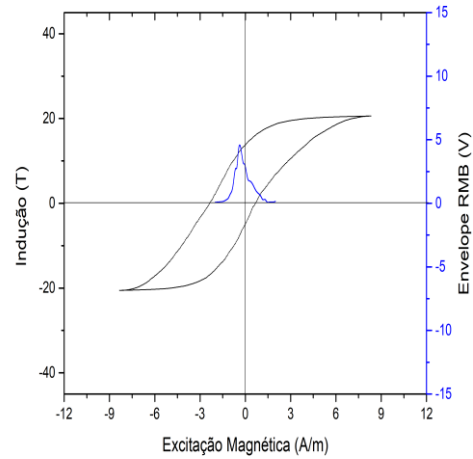


Figura 66 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

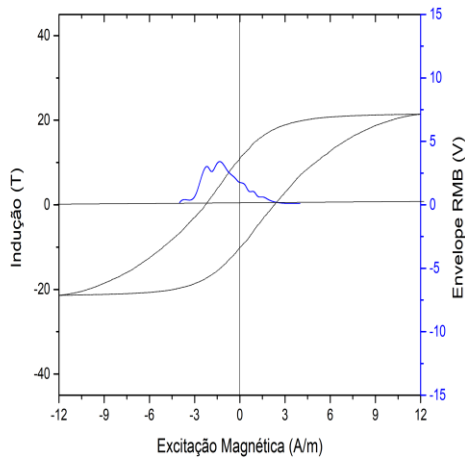


Figura 67 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz

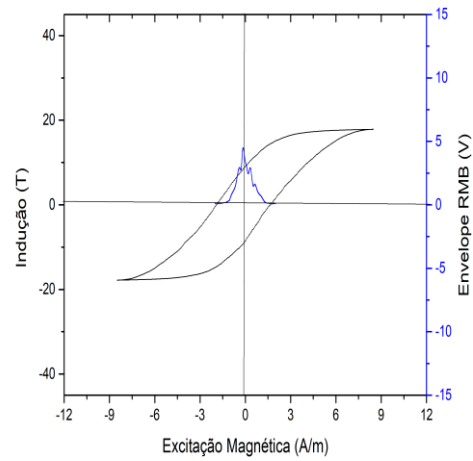


Figura 68 - Envelope do ruído magnético da amostra 2, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz

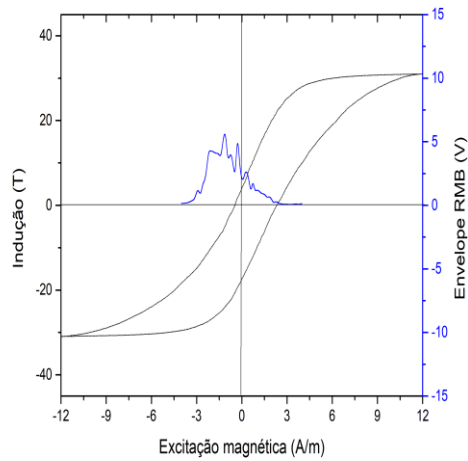


Figura 69 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

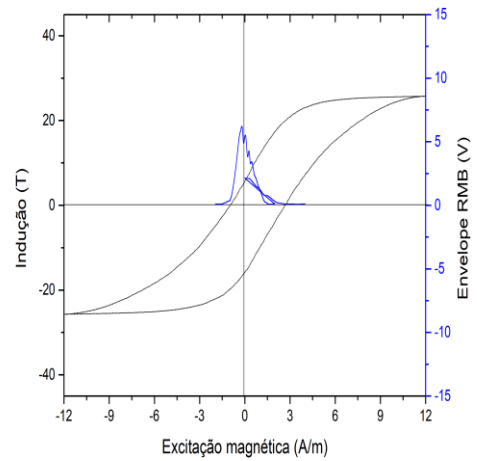


Figura 70 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

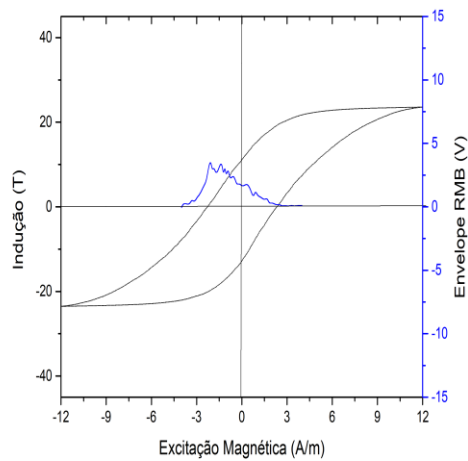


Figura 71 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

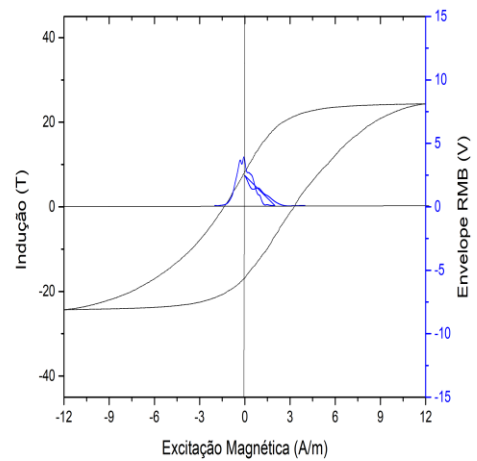


Figura 72 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

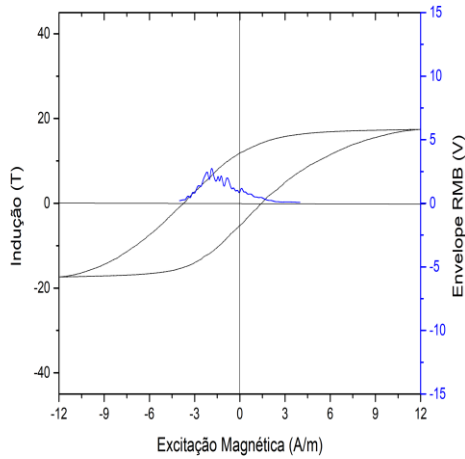


Figura 73 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz

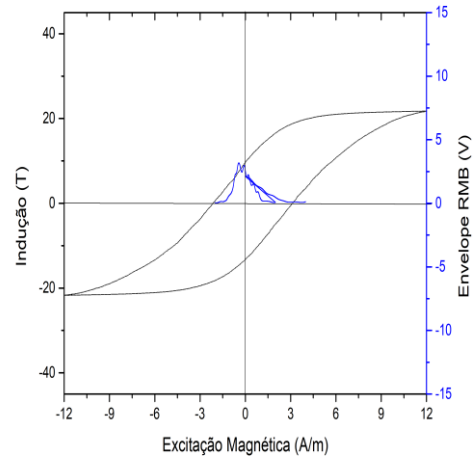


Figura 74 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face convexa, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz

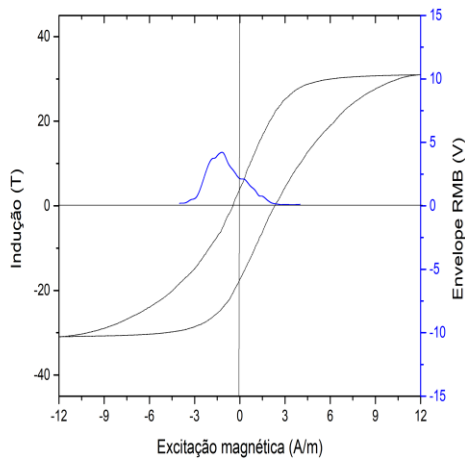


Figura 75 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

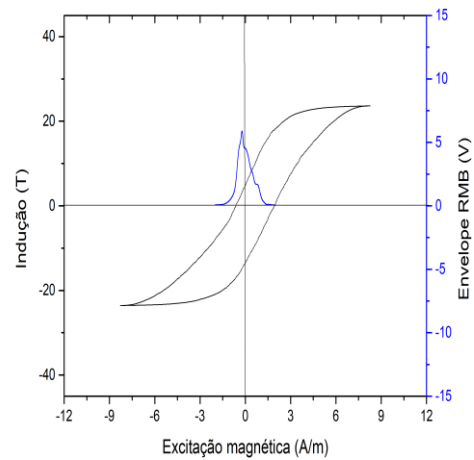


Figura 76 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

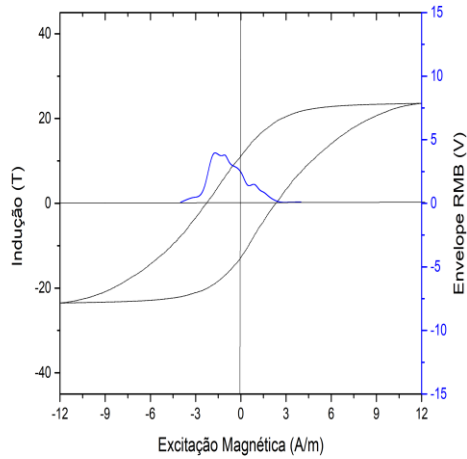


Figura 77 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 50 Hz

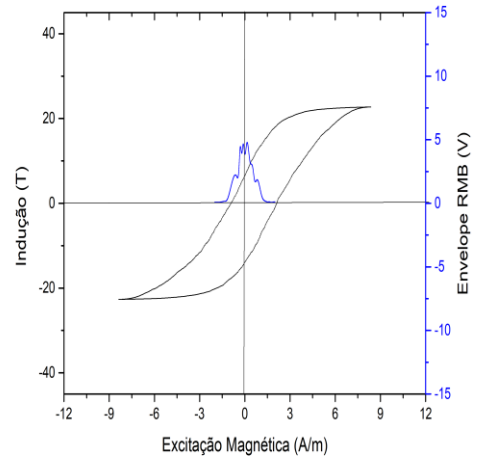


Figura 78 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção 45° da transversal de dobramento na frequência de 125 Hz

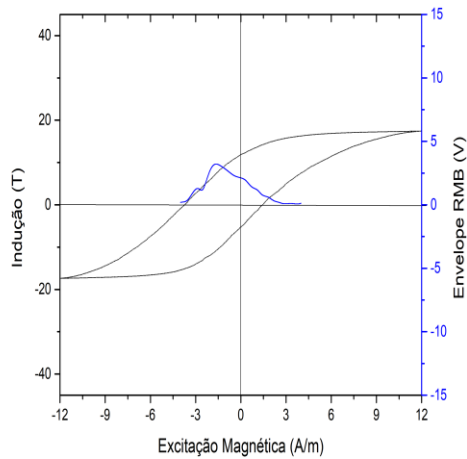


Figura 79 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 50 Hz

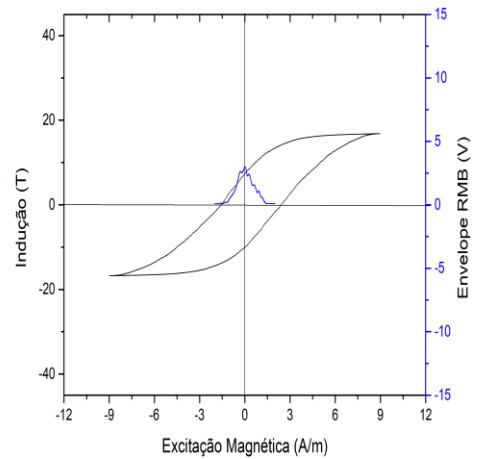


Figura 80 - Envelope do ruído magnético da amostra 3, face côncava, na direção de dobramento na frequência de 125 Hz

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Rodacoski, M.R.** *Medição de Tensões Residuais com Holografia Eletrônica*. Santa Catarina : UfSC _ Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
2. **BEER, F.P. e JOHNSTON, E.P.** *Resistência dos Materiais*. São Paulo : s.n., 2005. 3ª Edição.
3. **Lu, J.** *Handbook on Measurement of Residual Stress*. Lilburn, GA : SEM- Society for Experimental Mechanics, The Fairmont Press, 1996.
4. **Withers, P.J.A.** *Overview: Residual Stress. Part 1: Measurement Techniques*. s.l. : Journal of Materials Science and Technology, 2001.
5. —. *Overview: Residual Stress: Part 2: Nature and Origins*. s.l. : Journal of Materials Science and Technology, 2001.
6. **Cordovil, F.C.S.** *Desenvolvimento de um Dispositivo para Simulação Experimental de Tensões Residuais por Carregamento Mecânico*. s.l. : UFSC- Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
7. **JILES, D.** *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. *Springer Science and Business*. 1994, p. 454.
8. **Cullity, B.D. e C.D, Graham.** *Introduction to Magnetic Materials*. s.l. : IEE PRESS, Published by John Wiley & Sons, 2009.
9. **JILES, D.C.** The effects of stress on magnetic Barkhausen activity in ferromagnetic steels. *IEEE Transactions on Magnetics*. Setembro de 1989, pp. 3455-3457.
10. **JILES, D.** Dynamics of domain magnetization and the barkhausen effect. 2000, Vol. 50, pp. 893-988.
11. **GRIJALBA, F.A.F.** *Desenvolvimento de ensaio não destrutivo Baseado no Ruído Magnético de Barkhausen para Caracterização de Tensões Elásticas e Deformações Plásticas em Aços*. São Paulo : Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
12. **SHILLING, J. et. al.** Magnetic properties and domain structure in grain-oriented 3% si-fe. *IEEE Transactions on Magnetics* v.10. 7 de 1974, pp. 195-223.

13. **BOZORTH, R.** *Ferromagnetism*. 1. s.l. : Wiley-IEEE PRESS, 1993.
14. **GARDNER, C. et al.** The influence of mechanical stress on magnetization process and barkhausen jumps in ferromagnetic materials. *International Journal of Nondestructive testing*. 1971, pp. 131-169.
15. **WHITE, S et al.** Stress measurement using magnetic barkhausen noise and metal magnetic memory testing. *World Conference on Nondestructive Testing*. 2007, pp. 3501-3510.
16. **FRANCO, F. et al.** *Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído magnético de barkhausen para caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços*. s.l. : Universidade de são Paulo, 2010. pp. 93-103.
17. **MANDACHE, C. et al.** Investigation of optimum field amplitude for stress dependence of magnetic barkhausen noise. *IEE Transactions on Magnetics*. 2007, pp. 3976-3983.
18. **SORSA, A.** Prediction of material properties based on non-destructive barkhausen noise measurement. *Tese de Doutorado*. s.l. : University of Oulu Graduate School, 2013.
19. *Dynamics of domain magnetization and Barkhausen effect*. **JILES, D.C.** Czechoslovak : J. Phys, 2000, Vol. 8.
20. *Enhancing the precision of magnetocrystalline anisotropy energy estimation from barkhausen noise using a deep neural network*. **PEREZ-MONTES, FILIBERTO, et al.** s.l. : elsevier, 2020, Vol. 24.
21. **SHIN, K. et al.** Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers. 1. s.l. : John Wiley & Sons, 2008.
22. *Barkhausen noise measurements give direct observation of magnetocrystalline anisotropy energy in ferromagnetic polycrystals*. **J.H Espina-Hernández, J.A. Perez-Benitez, F.Caleyo, T. Baudin, A.L Helbert, J.M. Harllen.** s.l. : J.Phys.D.Appl.Phys, 2013, Vol. 46.
23. *Surface and subsurface stress evaluation in case-carburised steel using high and low frequency magnetic barkhausen emission measurements*. **MOORTHY, V., SHAW, B.A. e HOPKINS, P.** 2006, Journal of Magnetism and magnetic materials, pp. 362-375.

24. *Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis.* **MOORTY, V., SHAW, B.A e EVANS, J.T.** 2003, NDT & E International, pp. 43-49.

25. **FRANCO, F. et al.** Relation between magnetic barkhausen noise and hardness for jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels. *Journal of nondestructive evaluation.* 2013, pp. 93-103.

26. **KAPLAN, M. et al.** Characterization of dual-phase steels using magnetic barkhausen noise technique. *Journal of nondestructive evaluation.* 2007, pp. 79-87.

27. *Influence of magnetizing parameters on the magnetic barkhausen noise.* **DHAR, A e ATHERTON, D.L.** 1992, IEE Transactions on magnetics, pp. 3363-3366.

28. *Qualification od barkhausen noise method for the evaluation of time-dependent degradation.* **DONG-WONG, K. et al.** 2003, Journal of magnetism and materials, Vol. 257, pp. 175-183.

29. **RANJAN, R. et al.** Magnetic proprieties of decarburized steels: An investigation of the effects of grain size and carbon content. s.l. : IEEE transactions on magnetics, 1987, Vol. 23, pp. 1869-1876.

30. *Magnetic barkhausen noise and hysteresis loop in comercial carbon steel: influence os applied tensile stress and garin size.* **ANGLADA, J. et al.** 2001, Journal od magnetism and magnetic materials, Vol. 231, pp. 299-306.

31. *Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in astm 36 steel by the magnetic barkhausen noise.* **SANCHEZ, J. et al.** 2007, NDT&E Internationals, Vol. 40, pp. 168-172.

32. **STEFANITA, C.** Plastic versus elastic deformation effects on magnetic barkhausen noise in steel. *Acta metallurgica.* 2000, pp. 3545-3551.

33. **Willeman, D.P.** *Desenvolvimento de uma Roseta Óptica para medição de Tensões Residuais e Deformações utilizando Holografia Eletrônica.* Florianópolis : UFSC, 2002.

34. **MASOUMI, MOHAMMAD, et al.** *Effect of Pre-strain on Microstructure, Texture, and Strengthening of Fully Pearlitic Steel.* . s.l. : JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, 2022.

35. *In-situ tensile-shear test in SEM and DIC analysis of two pearlitic steel microstructures: undeformed-coarse and deformed-refined.* **PAIVA LEÃO, PABLO B., et al.** s.l. : Journal of Materials Research and Technology-JMR&T, 2023, Vol. 24.
36. **Stresstech.** *Prism Technical Guide.* s.l. : 4, 2016. Vol. 2.
37. **BEER, F. P e JOHNSTON, E.P.** *Resistência dos Materiais.* São Paulo : s.n., 2005.
38. *Trans. Magn.* **Jagadish, C., Clapham, L. and Atherton, D.L.** s.l. : IEEE, 1989.
39. *Magnetismo and Magnetic Materials.* **Kause, T.W. Clapham, L. and Atherton, D.L.** 1994.
40. *Plastic versus elastic deformation effects on magnetic barkhausen noise in steel.* **Stefanita, C.G e Atherton, D.L. and Clapham L.** 48, s.l. : Acta Materialia, 2000.
41. **J.R, Barton, et al.** Advanced quantitative magnetic nondestructive evaluation methods -Theory and experiment. *Nondestructive evaluation of Materials.* New york : s.n., 1979.
42. *Automated control of camshaft grinding process by barkhausen noise.* **R.M., Fix, K., Tiitto e S., Tiitto.** 7, s.l. : Materials Evaluation, Vol. 48.
43. **N., Christine.** *Análise de tensões residuais por ruído magnético de barkhausen e difração de raios-x em aço API 5L X70 com diferentes carregamentos.* Niterói : Universidade Federal Fluminense, 2016.
44. **Cullity, B.D.** *Introduction to Magnetic Materials.* Massachusetts : Addison-Wesley, 1972.
45. **C., Kittel e Galt, J.K.** *Ferromagnetic domain theory.* s.l. : Solid State Phys, 1956.
46. *Estimation of magnetocrystalline energy from barkhausen noise measurement=s in API %L steels.* **T.L. Manh, F.Caleyo,J.H.Espina-Hernández, J.A Perez-Benitez, J.M. Hallen.** s.l. : Int. J. Appl. Eletromagn, 2015, Vol. 48.
47. *Through-process characterization of local anisotropy of non-oriented electrical steel using magnetic barkhausen noise.* **Y. He. M. Mehdi, E.J. Hilinski, A. Edristy.** s.l. : J.Magn Magn. Mater, 2018. 453.

48. *Evaluation of the residual stress state of 42crmo4 steel sheets in a production line.*

Diasa, Allan Romário de Paula, et al. s.l. : Material Research, 2016. 10.1590/1980-5373-MR-2015-0091.

49. **Honkanen, Mari, et al.** Mimicking Barkhausen noise measurement by in-situ transmission electron microscopy- Effect of Microstructural steel features on barkhausen noise. *Acta Materialia*. 2021.

50. **jr, Clodualdo Aranas, H, Youling e Podlesny, Maciej.** Magnetic Barkhausen noise characterization of two pipeline steels with unknow history. *Materials Characterization* 146. 2018.

51. *Effect of hot rolling condicions on ridging in 16% Cr Ferritic stainless steel sheet.*

Annan, K.A. et.al. 2013, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.