MANUEL ALFREDO CALDAS MORGAN

Ruído Magnético de Barkhausen contínuo rotacional

São Paulo

2013

MANUEL ALFREDO CALDAS MORGAN

Ruído Magnético de Barkhausen contínuo rotacional

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Projeto e fabricação

Orientador: Prof. Dr.
Linilson Rodrigues Padovese

São Paulo
2013

RESUMO

Este trabalho apresenta os avanços no desenvolvimento de um novo método de ensaio não-destrutivo magnético. O método está baseado na técnica do Ruído Magnético de Barkhausen (RMB), particularmente em uma variante denominada Barkhausen Contínuo. O RMB é gerado devido à ação de um campo magnético variável magnetizante que produz mudanças abruptas e irreversíveis na estrutura magnética do material. Essas mudanças são influenciadas pela microestrutura e a distribuição de tensões dentro do mesmo. As medições podem ser usadas para construir uma distribuição bidimensional do RMB ao redor de um ponto fixo, cujo resultado irá refletir o nível de anisotropia magnética, usualmente indicando um eixo de fácil magnetização, parâmetro relevante dado que o comportamento da grande maioria de materiais ferromagnéticos de engenharia é usualmente anisotrópico. As mudanças no eixo de fácil magnetização podem indicar a presença de anomalias mecânicas ou abnormalidades no processo de fabricação e no caso da aplicação de uma tensão externa, podem refletir a magnitude e a direção da mesma. O presente trabalho descreve uma metodologia que faz uso de um campo magnético rotacional para obter sinais RMB relacionados ao ângulo de giro, possibilitando a identificação da direção do eixo de fácil magnetização, ultrapassando as capacidades oferecidas pela técnica RMB convencional mediante o fornecimento de informação em tempo real, que permite a obtenção de um conjunto de parâmetros que quantificam a anisotropia magnética de uma amostra. A técnica foi usada para a detecção do eixo de fácil magnetização e o nível de anisotropia magnética em materiais diferentes devida aos efeitos do processo de fabricação. Posteriormente foi demonstrado que a técnica é capaz de monitorar a evolução da tensão uniaxial aplicada, obtendo curvas de calibração, sensíveis ao sentido de aplicação da tensão. Para o caso pouco estudado de amostras submetidas a tensões biaxiais, o uso da técnica do Barkhausen contínuo rotacional fez possível de verificar que as características morfológicas das medições de anisotropia magnética obtidas, guardam relação com a direção das tensões principais. Foi realizada uma avaliação do método aplicado para a medição dinâmica de anisotropia magnética em juntas soldadas, indicando estados de tensão e características microestruturais coerentes com as esperadas. O método tem a possibilidade de ser implementado para medições anisotropia magnética em alta resolução/alta velocidade.

Palavras Chave: Ensaios não-destrutivos, Ruído magnético de Barkhausen, Anisotropia magnética, Campo magnético rotacional.

ABSTRACT

This work presents the current advances on the development of a new method of magnetic non-destructive testing. The method is based on the magnetic Barkhausen noise (MBN), more specifically in one branch known as Continuous Barkhausen. MBN is produced due to the effect of a variable magnetic field, which causes abrupt and irreversible changes to the magnetic structure of the material. These changes are influenced by the microstructure of the material and the stress distributions within. Measurements can be used to construct a bi-dimensional MBN distribution around a fixed point, which in turn will be a reflection of its magnetic anisotropy level, usually characterized by an easy axis of magnetization, an important parameter given that more often than not, the behavior of most engineering ferromagnetic materials is anisotropic. Variations of the easy axis could be the indication of mechanical anomalies or abnormalities that appear as a result of the fabrication process. If there is an external stress applied to the sample, it can provide information about its magnitude and direction. The present work describes a methodology which uses a precise rotating magnetic field in order to obtain MBN signals related to a given magnetization angle, making possible the finding of the easy axis, exceeding the limits of conventional MBN measurements by providing real time data which in turn will allow to infer a set of parameters that quantify the magnetic anisotropy of the sample. The proposed technique was successfully used to find both the easy axis and a quantitative level of magnetic anisotropy between different materials, consequence of the fabrication process. Subsequently, it was shown that the technique was able to perform a monitoring of the evolution of both uniaxial and biaxial applied stress, obtaining linear relationships (uniaxial case), sensitive to the direction of loading. In not so much studied case of biaxial loading, the use of the continuous rotational Barkhausen method made possible to observe that the morphologic characteristics of the magnetic anisotropy measurements bear a close resemblance to the direction of the principal stress field. An evaluation of the technique as a tool for the dynamic measurement of magnetic anisotropy on welded joints, indicating stress states and microstructural features coherent with the ones expected in this scenario. The method has the possibility of being implemented as a technique for high speed/high resolution measurements of magnetic anisotropy.

Key words: Non-destructive testing, Magnetic Barkhausen noise, Magnetic anisotropy, Rotating magnetic field.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Polos magnéticos nos extremos de um ímã ³	19
Figura 2 Partículas de ferro usadas para indicar a presença do campo magnético ³	19
Figura 3 Dipolo magnético	20
Figura 4 Campo magnético gerado pela corrente no interior de um solenoide	20
Figura 5 Momento magnético associado à órbita do elétron (a) e ao giro do mesmo sobre seu próprio eixo (b).....	24
Figura 6 Momentos magnéticos agrupados em domínios (a) junto com um detalhe do giro dos domínios nas paredes.	25
Figura 7 Configuração dos domínios durante várias etapas da magnetização	26
Figura 8 Laço de histerese magnética	28
Figura 9 Comparação entre os laços de histerese magnética para um material magnético duro e um material magnético mole.....	29
Figura 10 Processo de magnetização de um ímã permanente (a) junto com um detalhe do produto $BH_{máx}$ da curva de desmagnetização ³	30
Figura 11 Representação esquemática de um plano e uma direção cristalográfica dentro da célula unitária de um material policristalino.....	31
Figura 12 Anisotropia magneto-cristalina do Ferro (a) e do Níquel (b) ³	31
Figura 13 Representação esquemática dos domínios magnéticos em um material ferromagnético policristalino em condições de magnetização externa nula ⁷	32
Figura 14 Experimento original de Barkhausen (a) mostrando os saltos de voltagem registrados pela bobina (b) devidos a um processo de indução descontínuo (c) ³	33
Figura 15 Resposta em frequência típica de uma bobina leitora de indução.....	34
Figura 16 Equipamento para ensaios RMB (a) junto com os sinais de resposta típicos (b)	35
Figura 17 RMB no laço de histerese magnética associado	36
Figura 18 Envolvente do sinal RMB registrado durante de 1 ciclo de magnetização.....	38
Figura 19 Sinal RMB representado no domínio do tempo (a) e da frequência (b)	39

Figura 20 Variação do valor pico do RMB em relação à dureza ²⁶	43
Figura 21 Variação do RMS_{RMB} em relação ao teor de carbono ¹¹	44
Figura 22 Variação do RMS_{RMB} com a intensidade do campo magnético de excitação ²⁷	45
Figura 23 Variação do RMB em relação ao tamanho de grão ^{28; 29}	46
Figura 24 Alinhamento dos domínios magnéticos devido à tração (a) e à compressão (b)	47
Figura 25 Variação da amplitude do valor RMB em relação à tensão mecânica uniaxial ³⁰	48
Figura 26 Variação da amplitude do RMB em relação ao ângulo de magnetização para vários patamares de carregamento ³⁷	49
Figura 27 Montagem experimental (a) para avaliar a variação angular do RMB relativas à tração (b) e à compressão (c) em tubulações de aço ³⁸	50
Figura 28 Variação da $Energia_{RMB}$ relativa à tensão uniaxial em ambas as superfícies da amostra (a) junto com as medições angulares respectivas para um nível fixo de carregamento (b) ⁸	51
Figura 29 Distribuição da anisotropia magnética antes e depois do recozido ³⁹ ...	52
Figura 30 Representação polar da variação das medições angulares de RMB relativas à tração ⁴¹	53
Figura 31 Evolução dos parâmetros de ajuste da equação (15) em relação à tração ⁴³	54
Figura 32 Esquemático do dispositivo usado por Crouch ⁴⁴ (a) para a obtenção de sinais de RMB contínuo (b)	55
Figura 33 Sonda de RMB contínuo projetada por Franco ⁴⁶	56
Figura 34 Sinal de RMB contínuo usado na detecção defeitos volumétricos (esq.) junto com o RMS_{RMB} (dir.) ⁴⁶	57
Figura 35 Dispositivo usado por Vengrinovich ⁴⁸ para realizar medições angulares de RMB	58
Figura 36 Esquema da sonda de RMBCR	61
Figura 37 Sinal típico obtido usando a sonda RMBCR	61
Figura 38 Padrão de emissão de RMBCR de uma rotação completa para a identificação do eixo fácil (a). Representação esquemática da rotação dos ímãs (b) sobre uma região de alinhada com o eixo de fácil magnetização (c).....	63

Figura 39 Sincronização com o padrão de emissão RMBCR: Primeiramente, o sensor hall é localizado aleatoriamente na amostra (a) gerando o sinal de referência de giro (b), subsequentemente a sonda é deslocada (c) até que o sinal de referência (d) corresponda com o padrão de rotação da Figura 38	63
Figura 40 Processamento do sinal: Inicialmente a envolvente do RMBCR é calculada (a), em seguida um ciclo de rotação é isolado e grafado contra o ângulo de rotação (linha descontínua indica a direção perpendicular ao eixo fácil) (b) e finalmente é desfasado 90° e representado de forma polar (c).....	64
Figura 41 Resultados das medições na amostra 1 usando tanto o método RMB clássico (esq.) quanto o método RMBCR (dir.), o ajuste foi calculado para ambos os resultados.	65
Figura 42 Comparação entre os resultados normalizados obtidos usando ambas as técnicas na amostra 1	66
Figura 43 Resultados das medições na amostra 2 usando tanto o método RMB clássico (esq.) quanto o método RMBCR (dir.), o ajuste foi calculado para ambos os resultados	67
Figura 44 Comparação entre os resultados normalizados obtidos por ambas as técnicas na amostra 2	68
Figura 45 Resultados das medições na amostra 3 usando tanto o método RMB clássico (esq.) quanto o método RMBCR (dir.), o ajuste foi calculado para ambos os resultados.	68
Figura 46 Comparação entre os resultados normalizados obtidos por ambas as técnicas na amostra 3	69
Figura 47 Sinal usado para inferir o conjunto de parâmetros, correspondente a um fragmento do quadrado da envolvente de um ciclo de rotação junto com a linha que define a fronteira de anisotropia magnética. ...	71
Figura 48 Magnetizadores rotacionais de tipo quadrado(a), hexagonal (b) e circular(c) ⁵⁵	75
Figura 49 Dispositivo para análise de textura e anisotropia (a) e a configuração alternativa para homogeneizar o campo aplicado ^{58; 59}	76
Figura 50 Gráficos BH utilizando magnetização rotacional com B fixo (a) e com H fixo (b) ⁶⁰	77

Figura 51 Diferenças na magnetização rotacional decorrentes do giro em sentido anti-horário(a) e horário(b) ⁶¹	78
Figura 52 Possíveis desvios entre B e H em relação à intensidade de magnetização.....	78
Figura 53 Magnetizador bi-dimensional utilizado por Enokizono ⁶⁵	79
Figura 54 Vetores envolvidos na magnetização rotacional segundo Pfützner (a) e Enokizono(b) ^{63; 64}	80
Figura 55 Sinal RMBCR obtido utilizando diferentes valores de κ para uma frequência de giro de aproximadamente 13Hz.....	83
Figura 56 Mapas de anisotropia obtidos utilizando $\kappa=1.72\text{cm}$ (a), $\kappa=1.25\text{cm}$ (b) e $\kappa=2.1\text{cm}$ (c)	83
Figura 57 Parâmetros baseados na forma do mapa de anisotropia magnética ...	84
Figura 58 evolução de ϕ em função de κ magnetizando em sentido horário e anti-horário	85
Figura 59 Evolução da <i>Proporção de anisotropia</i> _{RMB de rotação} magnetizando em sentido horário e antihorário(a). Diferença entre mapas de anisotropia com parâmetros C_{EF} iguais e κ diferentes (b). Possível influência dos fatores que afetam o atraso (c).	86
Figura 60 Evolução do valor RMBCR a diferentes orientações em relação ao sentido de aplicação da tensão durante o carregamento da amostra 1	91
Figura 61 Evolução das características do vetor eixo fácil em relação ao carregamento na amostra 1	92
Figura 62 Evolução dos parâmetros de energia em relação ao carregamento na amostra 1	93
Figura 63 Evolução dos parâmetros percentuais em relação ao carregamento na amostra 1	93
Figura 64 Evolução do valor RMBCR a diferentes orientações em relação ao sentido de aplicação da tensão durante o carregamento da amostra 2	94
Figura 65 Evolução das características do vetor eixo fácil em relação ao carregamento na amostra 2	95
Figura 66 Evolução dos parâmetros de energia em relação ao carregamento na amostra 2	96

Figura 67 Evolução dos parâmetros percentuais em relação ao carregamento na amostra 2	96
Figura 68 Evolução da anisotropia magnética induzida pela tensão mecânica na amostra 1 (cortada no sentido longitudinal à DL)	98
Figura 69 Evolução da anisotropia magnética induzida pela tensão mecânica na amostra 2 (cortada no sentido transversal à DL)	99
Figura 70 Esquema da configuração experimental indicando os pontos de medição, o local de aplicação da carga e a direção de laminação ..	102
Figura 71 Medições utilizando extensometria (a) e os parâmetros RMBCR (b) no estado 1	104
Figura 72 Medições utilizando extensometria (a) e os parâmetros RMBCR (b) no estado 2	105
Figura 73 Desvio ϕ_{12} relativo a combinação de anisotropia magnética (estado 1) e a σ_1 (estado 2)	107
Figura 74 Medições utilizando extensometria (a) e os parâmetros RMBCR (b) no estado 3	108
Figura 75 Desvio entre ϕ_3 e θp_3 em função da anisotropia magnética (estado 1) e a σ_1 (estado 3)	110
Figura 76 Detalhe do desvio entre ϕ_3 e θp_3 em função da anisotropia magnética (estado 1) e a σ_1 (estado 3) dos pontos A,B e C	110
Figura 77 Simulação da direção das tensões principais decorrentes do carregamento assimétrico	111
Figura 78 Condições de carregamento inicial e final utilizados para o monitoramento da tensão biaxial contínua	114
Figura 79 Evolução dos parâmetros C_{EF} e C_{ED} em relação a σ_1	115
Figura 80 Perfis de ϕ e θp em relação a σ_1	116
Figura 81 Evolução dos parâmetros de energia RMBCR em relação a σ_1	117
Figura 82 Evolução dos parâmetros percentuais RMBCR em relação a σ_1	118
Figura 83 Comparação direta entre a representação polar das tensões principais e a sua distribuição de anisotropia magnética associada (Compressão)	120
Figura 84 Comparação direta entre a representação polar das tensões principais e a sua distribuição de anisotropia magnética associada (Tração) ..	121
Figura 85 Zona termicamente afetada durante o processo da solda ⁷³	124

Figura 86 Junta utilizada para depositar solda entre dois componentes de uma tubulação de AID	126
Figura 87 Sequencia de passes de solda em cada amostra. Podem ser detalhadas as trajetórias utilizadas para medir a micro dureza e para efetuar os mapeamentos RMBCR	127
Figura 88 Distribuição de tensões residuais em seções transversais de juntas soldadas decorrentes de diferentes processos metalúrgicos ⁷³	128
Figura 89 Microestrutura do MB (a), MS(b) e da linha da ZL(c) na amostra JPE1 ⁷⁶	128
Figura 90 Microestrutura do MB (a), MS(b) e da linha da ZL(c) na amostra JPE2 ⁷⁷	129
Figura 91 Perfis de ϕ e C_{EF} medidos na face transversal da mostra JPE1	129
Figura 92 Perfis de $d\phi/dx$ e micro dureza nas proximidades da junta JPE2 (a). Valor do parâmetro C_{EF} em função da dureza na região da solda (b).	131
Figura 93 Perfís de ϕ e C_{EF} medidos na face transversal da mostra JPE2	133
Figura 94 Perfil de $d\phi/dx$ nas proximidades da junta JPE2 (a). Perfil de micro dureza na região da solda (b).	134

SUMARIO

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivo	15
1.2	Organização do documento	15
2	Noções básicas sobre magnetismo	18
2.1	Definição de magnetismo	18
2.2	Campo magnético	18
2.3	Indução magnética	21
2.3.1	Suscetibilidade magnética.....	21
2.3.2	Permeabilidade magnética.....	21
2.4	Materiais magnéticos	22
2.5	Estrutura Magnética	23
2.5.1	Momentos magnéticos	23
2.5.2	Domínios magnéticos.....	24
2.5.3	Processo de magnetização	25
2.5.4	Histerese magnética.....	27
2.5.5	Anisotropia Magnética na estrutura cristalina.....	30
3	RMB clássico e ensaios não-destrutivos	33
3.1	Configuração experimental para a obtenção do sinal RMB	33
3.2	Análise do sinal RMB	37
3.2.1	Análise no tempo.....	37
3.2.2	Análise no domínio da frequência	39
3.3	Fatores que afetam o sinal RMB	40
3.3.1	Frequência de magnetização	40
3.3.2	Dureza - Teor de Carbono.....	42
3.3.3	Intensidade de magnetização.....	44
3.3.4	Tamanho de grão	45
3.3.5	Medições de tensão mecânica usando RMB	46
3.4	Anisotropia magnética macroscópica utilizando RMB.....	48
3.5	Barkhausen Contínuo.....	55
4	O método RMB Contínuo rotacional.....	58
4.1	Introdução	58
4.2	Materiais e métodos	60

4.3	Resultados	64
4.3.1	Resultados baseados nos parâmetros α e β	65
4.4	Um conjunto de parâmetros alternativos para as medições usando o método RMBCR.	69
4.5	Interpretação	72
4.6	Conclusões.....	72
5	Observações experimentais derivadas do RMB produzido por meio da magnetização rotacional.....	74
5.1	Introdução	74
5.2	Dispositivos para magnetização rotacional	75
5.3	Medições B-H utilizando magnetização rotacional	76
5.4	Desvio do vetor B (B) em relação ao vetor H (H)	78
5.5	Repercussão dos atrasos BH nas medições de anisotropia obtidas mediante o método RMBCR – observações experimentais	81
5.6	Conclusões.....	87
6	Uso do método RMBCR para monitoramento de tensão uniaxial.	89
6.1	Introdução	89
6.2	Materiais e métodos	89
6.3	Resultados e discussão	90
6.3.1	Evolução da anisotropia magnética devida à tensão mecânica	97
6.4	Conclusões.....	100
7	Mapeamento da direção de campos de tensões em superfícies ferromagnéticas.....	101
7.1	Introdução	101
7.2	Materiais e métodos	101
7.3	Resultados e discussão	103
7.4	Conclusões.....	112
8	Uso do método RMBCR para monitoramento da tensão biaxial contínua..	113
8.1	Introdução	113
8.2	Materiais e métodos	113
8.3	Resultados e discussão	114
8.3.1	Evolução da anisotropia magnética devida à tensão mecânica	118
8.4	Conclusões.....	122
9	Medições dinâmicas utilizando o RMBCR – aplicação prática em juntas de solda.....	123

9.1	Introdução	123
9.2	Materiais e métodos	125
9.3	Resultados e discussão	128
9.4	Conclusões.....	136
10	Produção científica e técnica	138
11	Conclusões	139
12	Trabalhos futuros.....	142
	Referências.....	143

1 Introdução

O projeto dos componentes mecânicos e estruturais na engenharia está limitado pelas propriedades mecânicas dos materiais, assim como pelos métodos usados na sua fabricação. Uma vez em serviço os componentes sofrerão processos que irão alterar as suas características e afetarão a vida útil projetada. Para acompanhar a evolução da vida útil, é importante inspecionar os componentes, de preferência sem retirar a peça, sem alterá-la, buscando sinais de desgaste ou degradação. O conjunto de técnicas que cumpre essas condições é conhecido como Ensaios não-destrutivos (END), às vezes chamados também de Inspeção não Destrutiva (IND) ou Avaliação não Destrutiva (AND).

Embora o uso dos END não garanta que uma falha não irá acontecer, eles têm um papel muito importante, que é minimizar as possibilidades de falha e maximizar a disponibilidade do sistema.

Existem diferentes tipos de END, dentro dos quais podem se mencionar os seguintes:

- Ensaio Visual
- Líquido Penetrante
- Técnicas radiográficas
- Ultrassom
- Termografia
- Métodos magnéticos.

Este trabalho usa uma técnica que pertence à família dos métodos magnéticos, baseado no ruído magnético de Barkhausen (RMB). O RMB como técnica de END utiliza o efeito Barkhausen, descoberto em 1919 pelo Dr. Heinrich Barkhausen. Barkhausen notou que durante a exposição lenta e gradativa de um espécimen de ferro a um campo magnético, uma série de estalos eram produzidos conforme a amplitude do campo ia mudando. Estes estalos eram detectados por uma bobina de arame de cobre enrolado ao redor do espécimen, ligada em um amplificador de áudio. Desta maneira, obtinha-se uma resposta discreta da estrutura magnética do material quando submetida a um processo de magnetização contínuo.

A técnica RMB (descrita na seção 1.4 na configuração tradicional para avaliação de superfícies) tem sido amplamente utilizada na área dos END. Posteriormente, na seção 3.4 serão descritas algumas das aplicações mais relevantes da técnica RMB.

Há uma década que o Laboratório de Dinâmica e Instrumentação (LADIN) da Universidade de São Paulo desenvolve tecnologia própria de END baseados no RMB. Este desenvolvimento abrange a fabricação de equipamentos, software e aplicações tecnológicas.

Embora a técnica seja versátil, o LADIN já incursionou em aplicações não convencionais do RMB, tais como o RMB Contínuo, obtendo resultados promissores na área da inspeção rápida de superfícies.

1.1 Objetivo

Desenvolver uma técnica de ensaios não-destrutivos magnéticos, baseada no efeito Barkhausen, que permita expandir os limites da utilização do RMB tradicional, visando uma aplicação no mapeamento e/o monitoramento de tensões mecânicas (aplicadas ou residuais) em superfícies ferromagnéticas, em tempo real.

1.2 Organização do documento

O documento da qualificação está organizado como segue:

- O capítulo 2 apresenta noções teóricas básicas sobre o magnetismo, materiais magnéticos e as estruturas que os compõem, os domínios magnéticos, descrevendo também o processo de magnetização.
- O capítulo 3 descreve o fenômeno do RMB e a forma na qual este é medido. São descritos alguns dos principais fatores que influenciam a geração do RMB que dependem tanto das condições de medição como do estado de tensões na amostra e algumas das suas propriedades metalúrgicas. Também é feita uma transição entre as medições unidirecionais tradicionais, e as medições angulares associadas com variações espaciais do RMB. Na parte final é descrita uma técnica alternativa para a obtenção do RMB, o Barkhausen contínuo.

- O capítulo 4 apresenta uma nova técnica denominada RMB contínuo rotacional (RMBCR), baseada no RMB contínuo. A técnica foi utilizada para efetuar medições de anisotropia magnética em amostras de aço previamente analisadas utilizando a técnica RMB tradicional. Foi possível propor um conjunto de parâmetros derivado das medições RMBCR. A metodologia e resultados destes experimentos foram divulgados pela revista *NDT&E International*, publicada pela editora *Elsevier*, no artigo intitulado “*Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method*”.
- O capítulo 5 descreve um pouco mais em detalhe o processo de magnetização rotacional utilizado pelo método RMBCR. É ilustrado o procedimento para escolher as condições ótimas de magnetização que resultam em um mapeamento confiável da distribuição de anisotropia magnética na superfície analisada.
- O capítulo 6 apresenta os resultados do monitoramento em tempo real da evolução da anisotropia magnética em amostras de aço estrutural, induzida mediante um carregamento uniaxial contínuo. Os resultados apresentaram comportamento coerente com o que se esperaria de um experimento semelhante, utilizando a técnica RMB tradicional.
- No capítulo 7 o método RMBCR é utilizado para detectar a direção do campo de tensões principais mediante as mudanças da anisotropia magnética em uma superfície ferromagnética submetida aos efeitos de um carregamento assimétrico fixo (em estado de tensão biaxial). O método RMBCR apresentou uma tendência bastante similar à registrada por meio de extensometria clássica e de simulações por elementos finitos.
- O capítulo 8 apresenta uma abordagem também inédita, na qual a anisotropia magnética induzida por um estado de tensão biaxial, consequência de um carregamento assimétrico contínuo, é monitorada em tempo real. Os resultados, bastante encorajadores, indicaram que com um procedimento de calibração minucioso, o método RMBCR poderia ser utilizado para detectar (e até quantificar) estados de tensão, tanto aplicada como residual.
- O capítulo 9 apresenta uma aplicação prática do método RMBCR na avaliação de juntas de aço inoxidável duplex soldadas. Os parâmetros

RMBCR são utilizados para caracterizar a zona termicamente afetada, e avaliar características microestruturais decorrentes do processo de solda.

- O capítulo 10 resume a produção científica e técnica, publicada até o momento como resultado do trabalho desenvolvido neste projeto de doutorado.
- Nos capítulos 11 e 12 são apresentados respectivamente as conclusões mais relevantes deste trabalho, bem como algumas ideias e sugestões para trabalhos futuros.

2 Noções básicas sobre magnetismo

O propósito deste capítulo é introduzir os conceitos básicos associados com o magnetismo utilizados neste trabalho. Os conceitos estão associados com eventos complexos que acontecem em uma escala atômica, porém, são tratados de maneira simplificada e podem ser considerados como uma introdução. Uma descrição mais detalhada dos conceitos pode ser encontrada em textos clássicos de magnetismo^{1; 2; 3; 4}.

2.1 Definição de magnetismo

O magnetismo é um fenômeno comumente relacionado com minerais que são capazes de atrair outros objetos. Na atualidade os conhecemos como ímãs permanentes, e são feitos geralmente usando substâncias que contêm ferro. Eles atraem e repelem outros ímãs, além de ter a capacidade de magnetizar outros objetos que contem ferro na sua composição química.

O ferro, níquel e cobalto, alguns aços e a magnetita (óxido de ferro, Fe_3O_4) são conhecidos exemplos de materiais que apresentam propriedades magnéticas. No entanto, os ímãs não são os únicos elementos capazes de magnetizar. Em 1819, o físico dinamarquês Hans Christian Ørsted encontrou uma relação entre a eletricidade e o magnetismo ao demonstrar que a corrente elétrica circulando por um fio desviava a agulha de uma bússola situada nas proximidades, isto devido ao campo magnético produzido.

2.2 Campo magnético

As forças de atração aparentemente têm origem em regiões denominadas *polos*, situadas próximas das bordas do ímã. A Figura 1 ilustra um ímã no qual um extremo procura o polo norte geográfico da terra, conseqüentemente, este extremo é denominado polo norte.

Os polos diferentes se atraem, e os iguais se repelem, o que significa que existe uma região que aponta para o polo sul geográfico da terra, o polo sul do ímã.

Figura 1 Polos magnéticos nos extremos de um ímã³

Pequenas partículas de ferro distribuídas ao redor de um ímã indicam a presença de um *campo magnético*. Tal como se mostra na Figura 2, elas se alinham em trajetórias denominadas *linhas de campo*.

Figura 2 Partículas de ferro usadas para indicar a presença do campo magnético³

Quando um ímã é dividido em dois, são obtidos dois ímãs. Se a divisão continuasse sucessivamente, o limite de divisão seria o *dipolo magnético*, que constitui a mínima unidade magnética possível. Os dipolos magnéticos de um material são influenciados na presença de um campo magnético externo, já que a força do mesmo exerce um torque que tende a orientá-los na direção do campo. O momento magnético associado é indicado por uma seta (Figura 3).

Figura 3 Dipolo magnético

A corrente que circula através de uma bobina (Figura 4) também é capaz de produzir um campo magnético. A bobina usada para produzir um campo magnético é denominada solenoide. O campo gerado no seu eixo está dado pela expressão:

$$H = \frac{ni}{L}, \quad (1)$$

onde n corresponde ao número de voltas, i corresponde à corrente aplicada e L corresponde ao comprimento do solenoide. O campo é independente do raio do solenoide desde que este seja pequeno em comparação ao comprimento.

Figura 4 Campo magnético gerado pela corrente no interior de um solenoide

No interior do solenoide, o campo magnético é relativamente uniforme, com exceção dos extremos. O campo magnético externo é semelhante ao produzido por um ímã permanente.

2.3 Indução magnética

Quando a corrente gera um campo magnético H no interior do solenoide de área transversal A , é obtido um fluxo magnético dado pela expressão:

$$\varphi_{gerado} = H \cdot A \quad (2)$$

Quando o solenoide está vazio, o fluxo magnético medido é exatamente igual a φ_{gerado} , porém ao colocar uma barra de ferro no interior observa-se que um acréscimo no fluxo dado pela expressão:

$$\varphi_{medido} = B \cdot A, \quad (3)$$

onde, B é denominado *indução*.

2.3.1 Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética é a constante de proporcionalidade entre a magnetização M de um material e o campo magnetizante aplicado e é definida como:

$$\chi_m = M/H \quad (4)$$

A suscetibilidade magnética tem um limite estabelecido pela máxima magnetização possível, a *magnetização de saturação* (M_s), a qual representa o ponto no qual todos os momentos magnéticos do material encontram-se alinhados com o campo magnetizante aplicado.

2.3.2 Permeabilidade magnética

A constante de proporcionalidade entre a indução total B no material e o campo utilizado para produzi-la é denominada permeabilidade magnética e está definida como:

$$\mu = B/H \quad (5)$$

No caso da aplicação do campo magnético no vácuo, tem-se:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb}/(\text{A} \cdot \text{m}) \quad (6)$$

Habitualmente é usada a permeabilidade magnética do material em relação à permeabilidade magnética do vácuo. A proporção é denominada *permeabilidade relativa* e está dada por:

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \quad (7)$$

Pode se pensar na permeabilidade magnética como uma medida da facilidade com a qual um campo B pode ser induzido na presença de um campo magnético externo H .

Desta maneira, a relação entre B , H e M está dada pela expressão:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (8)$$

As propriedades magnéticas não dependem unicamente desses três parâmetros, mas também da maneira como a proporção entre eles varia.

2.4 Materiais magnéticos

Não são todos os materiais que respondem da mesma maneira que a barra de ferro citada na seção anterior. Eles podem ser classificados em três grupos de acordo com o comportamento do φ_{medido} em relação ao φ_{gerado} (Tabela 1).

Tabela 1 Comportamento dos materiais

Comportamento	Tipo de Material	Exemplos
$\varphi_{medido} < \varphi_{gerado}$	Diamagnético	Cu, Ag, Au, Bi
$\varphi_{medido} > \varphi_{gerado}$	Paramagnético	Al, Pt, Ti
$\varphi_{medido} \gg \varphi_{gerado}$	Ferromagnético	Fe, Ni, Co

O foco dos END é avaliar os materiais ferromagnéticos, os quais em virtude das suas propriedades magnéticas exibirem uma forte dependência em relação a um campo magnético aplicado.

2.5 Estrutura Magnética

Os materiais ferromagnéticos têm a sua estrutura definida por pequenas regiões de volume nas quais os momentos magnéticos estão alinhados na mesma direção. Para entender as propriedades magnéticas macroscópicas dos materiais é necessário visualizar o conceito de momento magnético na escala atômica, para compreender como eles se agrupam em regiões denominadas *domínios magnéticos* e de que maneira o seu comportamento origina fenômenos como a *histerese* e a *anisotropia magnética*.

2.5.1 Momentos magnéticos

Os momentos magnéticos descritos macroscopicamente na seção 2.2 realmente estão associados com elétrons individuais na estrutura atômica do material. No modelo atômico simplificado, um elétron de carga negativa, orbita o núcleo atômico com carga positiva ao mesmo tempo em que gira ao redor do seu próprio eixo. No primeiro caso, ilustrado na Figura 5a, o elétron pode ser considerado como uma carga elétrica circulando em um solenoide de uma volta, gerando um campo magnético no processo. A Figura 5b ilustra o segundo caso, no qual o elétron gera um pequeno campo magnético devido à sua rotação ou *spin*, ao longo do eixo de giro. A aplicação de um campo magnetizante faz com que os elétrons recebam um torque, tendo que alinhar o seu campo magnético próprio com a magnetização aplicada.

A direção de *spin* somente pode ser paralela ou antiparalela, ou seja, somente pode apontar para cima ou para baixo. Cada elétron em um átomo pode ser considerado um pequeno ímã.

Em cada orbital atômico cabe um par de elétrons. Os elétrons, organizados em pares, sempre possuem direções de spin opostas, desta maneira, o campo magnético produzido por cada um se cancela. Como resultado, os materiais cuja estrutura atômica possui orbitais completos, têm uma resposta fraca a um campo magnético aplicado, que persiste somente enquanto o campo externo está presente; este é o caso dos materiais diamagnéticos. Os materiais com orbitais incompletos possuem um momento magnético diferente de zero, como no caso dos materiais paramagnéticos e ferromagnéticos.

Figura 5 Momento magnético associado à órbita do elétron (a) e ao giro do mesmo sobre seu próprio eixo (b)

Os materiais ferromagnéticos caracterizam-se por ter os seus momentos magnéticos orientados em uma direção definida, formando as regiões conhecidas como *domínios magnéticos*.

2.5.2 Domínios magnéticos

Os domínios magnéticos são estruturas microscópicas que agrupam um conjunto de momentos magnéticos magnetizados até M_s , a qual é função da temperatura. Em cada domínio, os momentos estão orientados em uma mesma direção (*direção de fácil magnetização*) de forma espontânea. Esta orientação é função da *temperatura de Curie* (T_c), a qual está definida como a temperatura sobre a qual a excitação

térmica é grande o suficiente para eliminar a organização espontânea. No caso de não existir uma magnetização externa ou residual, os domínios estão orientados aleatoriamente, de maneira tal que a soma de todos os momentos magnéticos é zero. Entre domínios opostos existem regiões de transição denominadas *paredes de domínio*, nas quais os momentos giram de acordo à direção do domínio magnético adjacente. Como indicado na Figura 6, os domínios classificam-se de acordo à orientação relativa dos domínios vizinhos, com paredes de 180° e paredes de 90° (Figura 6).

Figura 6 Momentos magnéticos agrupados em domínios (a) junto com um detalhe do giro dos domínios nas paredes.

2.5.3 Processo de magnetização

Durante o processo de magnetização de um material ferromagnético, ilustrado na Figura 7, a indução B não tem um comportamento linear em relação ao campo aplicado H . As paredes de domínio orientadas aleatoriamente se deslocam como consequência do crescimento dos domínios orientados de forma favorável ao campo aplicado. Dessa maneira novos domínios são originados em quanto outros com direções de magnetização não favoráveis, são aniquilados. Posteriormente os domínios giram para se alinhar com a direção do campo aplicado e quando chegam à parte final da curva os poucos domínios restantes são aniquilados e o material se converte em um único domínio, que gira até alcançar um alinhamento total com a direção do campo aplicado.

A curva apresentada na Figura 7 é conhecida como *curva de magnetização inicial*. Ela descreve o processo desde a magnetização zero até a magnetização de saturação, a qual tem uma *indução de saturação* (B_s) associada.

Tanto o processo de magnetização quanto a movimentação de paredes associada são afetados pela presença de tensões e defeitos na estrutura cristalina do material, tais como vacâncias, inclusões, partículas de segunda fase, discordâncias, defeitos pontuais e contornos de grão. Os defeitos, que atuam como barreiras na movimentação das paredes de domínio, são conhecidos como *pontos de ancoragem*.

Figura 7 Configuração dos domínios durante várias etapas da magnetização

Quando uma parede de domínio encontra um ponto de ancoragem no processo de magnetização, a energia requerida para se movimentar e ultrapassá-lo cresce. O processo continua até a parede encontrar um novo ponto de ancoragem na sua trajetória. Uma vez que a magnetização é retirada, inevitavelmente, os domínios não conseguem retornar a sua configuração original, fazendo com que a movimentação das paredes seja irreversível.

Consequentemente, o processo de magnetização é descontínuo e irreversível. Este processo está composto por pequenos saltos produzidos quando as paredes

de domínio superam os pontos de ancoragem. Estes saltos de magnetização são conhecidos como o *efeito Barkhausen*.

2.5.4 Histerese magnética

A natureza irreversível do processo de magnetização se observa melhor ao traçar a resposta de B em relação a um H aplicado, o qual pode ser positivo ou negativo. A curva obtida, ilustrada na Figura 8, se denomina *laço de histerese magnética*. A forma da curva é sensível a parâmetros como a intensidade do campo magnetizante, a frequência de magnetização, a temperatura, a microestrutura do material e a tensão, seja aplicada ou residual. A área dentro do laço de histerese magnética representa uma perda de energia. O gráfico permite determinar algumas propriedades, tais como:

- A indução máxima ($B_{m\acute{a}x}$)
- O campo máximo (H_m): O campo necessário para levar o material até B_s .
- O campo coercitivo (H_c): O campo necessário para levar o material desde B_s até $B = 0$.
- A indução de remanência (B_r): A indução magnética retida quando o campo magnético é reduzido de H_m até $H = 0$.
- A permeabilidade máxima ($\mu_{m\acute{a}x}$): O máximo valor de B/H obtido durante o ciclo.
- A permeabilidade inicial (μ_i): O valor da inclinação da curva de magnetização inicial que descreve a permeabilidade relativa para valores baixos de H .

Dependendo da forma do laço de histerese os materiais magnéticos podem ser classificados em dois grandes grupos, *materiais magnéticos moles*, os quais são relativamente fáceis de magnetizar e desmagnetizar e *materiais magnéticos duros*, nos quais ambos os processos são mais difíceis (Figura 9).

Os materiais magnéticos moles estão caracterizados por uma perda de energia menor no processo de magnetização/desmagnetização, eles possuem uma alta μ_i ao mesmo tempo em que apresentam um valor de H_c pequeno, isso faz com que

eles alcancem $B_{m\acute{a}x}$ com um campo aplicado relativamente baixo. S\~ao utilizados em aplica\~oes que requerem magnetiza\~ao alternante com uma baixa reman\~encia, como por exemplo, transformadores el\~etricos.

Figura 8 Laço de histerese magnética

Figura 9 Comparação entre os laços de histerese magnética para um material magnético duro e um material magnético mole

Os materiais magnéticos duros possuem um H_c alto, já que uma vez magnetizados, devem poder resistir à desmagnetização que pode ser originada por outros campos magnéticos presentes no ambiente de trabalho, inclusive o seu próprio campo. Eles são a base dos *ímãs permanentes*. A função dos ímãs permanentes é a de prover um campo magnético através de dois polos livres. Um ímã permanente é produzido quando um material ferromagnético duro é conformado na geometria desejada e um campo H_1 é aplicado e retirado, causando que indução B tenha a forma ilustrada na Figura 10a. O ponto de operação do ímã (P) está dado pela interseção da linha OC , denominada *linha de carga*, com a curva traçada no segundo quadrante do laço de histerese, conhecida como *curva de desmagnetização*. Para um ímã de qualquer volume, a energia que ele possui para magnetizar é proporcional ao produto BH , conhecido como *produto de energia*. O valor do produto de energia também é representativo da energia necessária para desmagnetizar o ímã permanente, então, quanto mais alto o produto de energia,

mais duro o ímã. Para um uso mais eficiente do material, a geometria do ímã deve ser projetada de uma maneira em que a linha de carga passe pelo ponto no qual o produto de energia é máximo. Por exemplo, na curva da Figura 10b, para maximizar as propriedades do ímã, a sua geometria deveria ser alterada para que P coincidisse com o produto de energia máximo BH_{max} .

Figura 10 Processo de magnetização de um ímã permanente (a) junto com um detalhe do produto $BH_{máx}$ da curva de desmagnetização³

2.5.5 Anisotropia Magnética na estrutura cristalina

Os materiais metálicos possuem estruturas policristalinas, ou seja, eles estão divididos em regiões (grãos ou cristais) as quais apresentam padrões periódicos de organização espacial ao longo de grandes distâncias atômicas. O elemento fundamental da estrutura cristalina é a célula unitária, definida em termos das posições dos átomos do material dentro de um volume paralelepípedo. Dentro deste volume cristalográfico, os átomos podem estar agrupados tanto em diferentes planos quanto direções, identificados mediante um sistema de notação própria^{3; 5}, onde direções e planos equivalentes são agrupados em famílias. A Figura 11 ilustra o exemplo de uma célula unitária na qual está indicado o plano cristalográfico (100) e a direção cristalográfica [001].

Figura 11 Representação esquemática de um plano e uma direção cristalográfica dentro da célula unitária de um material policristalino

Usualmente os grãos dos materiais policristalinos encontram-se orientados de uma maneira não aleatória, apresentando uma orientação preferencial denominada *textura metalográfica*, a qual está definida pela função de distribuição das células unitárias, independentemente do seu tamanho e forma⁶.

A Figura 12 apresenta os efeitos da magnetização em cristais únicos de Ferro e Níquel onde a forma da curva $BM(BH)$ depende da direção da magnetização, já que eles são mais fáceis de magnetizar em certas direções cristalográficas, mostrando a existência de uma anisotropia magneto-cristalina.

Figura 12 Anisotropia magneto-cristalina do Ferro (a) e do Níquel (b)³

Cada grão pode consistir de mais do que um domínio magnético, cada um com seus eixos fáceis alinhados em uma direção predominante⁷, como ilustrado na Figura 13,

no entanto, desde um ponto de vista macroscópico, o material terá um comportamento anisotrópico regido pela média ponderada dos grãos individuais³.

Figura 13 Representação esquemática dos domínios magnéticos em um material ferromagnético policristalino em condições de magnetização externa nula⁷.

Devido à estrutura de domínios presente nos materiais ferromagnéticos, uma magnetização externa vem acompanhada de uma deformação da célula unitária (*magnetostricção*). A magnetização não depende unicamente das direções preferenciais cristalográficas, mas também do tamanho e forma do cristal e a distribuição do campo magnético ao seu redor⁶.

3 RMB clássico e ensaios não-destrutivos

Neste capítulo, é apresentado o estado da arte sobre a utilização do RMB para a caracterização de materiais. Esta técnica tem sido amplamente usada, não só para medição de tensão aplicada, como também para medição de tensões residuais⁸, assim como na distinção de outras características, tais como tamanho de grão^{9; 10}, teor de carbono^{11; 12}, fluência¹³, tratamento térmico¹⁴, fadiga^{15; 16} e deformações, tanto plásticas como elásticas¹⁷, entre outras.

Na seção 3.5, é introduzida uma variante da técnica RMB denominada *RMB contínuo*, na qual as variações do campo magnético, além de ser temporais, também são espaciais, sendo originadas por ímãs permanentes em movimento.

3.1 Configuração experimental para a obtenção do sinal RMB

O experimento original de Barkhausen é ilustrado na Figura 14a. Neste experimento, ao aproximar um ímã permanente a uma barra de ferro os saltos de voltagem induzidos na bobina enrolada ao redor da barra são amplificados através de um alto falante (Figura 14b). Se fosse possível ampliar uma parte da curva de magnetização inicial da barra (Figura 14c), poderia se observar a natureza descontínua de B .

Figura 14 Experimento original de Barkhausen (a) mostrando os saltos de voltagem registrados pela bobina (b) devidos a um processo de indução descontínuo (c)³

Comumente, para captar essas descontinuidades de B , são utilizadas bobinas leitoras de indução como elementos sensores. Estas bobinas são constituídas por um enrolamento com grande número de voltas de fio condutor elétrico, usualmente

de cobre. Apesar da sua simplicidade, elas constituem os sensores magnéticos mais antigos e melhor conhecidos. A sua voltagem lida é função de B e está dada pela lei de indução de Faraday¹⁸:

$$V = -n \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} = -\mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \frac{dH}{dt}. \quad (9)$$

Neste caso, um fluxo magnético φ passa através da bobina com n voltas, que possui uma área transversal A . Dado que a resposta da bobina é proporcional a dB/dt , elas não respondem a campos magnéticos DC. No caso das bobinas serem utilizadas para obter a resposta magnética de um material, como no caso do RMB, o campo de excitação deve apresentar uma variação temporal, que pode ser produzida ao usar um campo alternante H_a com uma frequência f de variação do campo H da forma:

$$H_a = H \cdot \sin(2\pi ft), \quad (10)$$

Devido ao fato das bobinas responderem somente a campos magnéticos AC, a sua resposta é mais bem visualizada no domínio da frequência. A Figura 15 ilustra a resposta em frequência típica de uma bobina leitora de indução. O ponto para o qual a resposta da bobina é máxima em função de uma determinada frequência se denomina *frequência de ressonância*. Estas bobinas constituem o sensor RMB por excelência.

Figura 15 Resposta em frequência típica de uma bobina leitora de indução

A Figura 16 a ilustra a disposição experimental clássica para a medição do RMB, composta por um eletroímã para a excitação magnética e uma bobina leitora. A magnetização do eletroímã, localizado na superfície de uma amostra ferromagnética, é gerada utilizando uma onda senoidal que passa através de um amplificador de corrente. A corrente amplificada circula por meio da bobina de magnetização, enrolada no seu núcleo (material ferromagnético em forma de U, usualmente chamado de *yoke*). A magnetização alternante, tipicamente com frequências entre 1Hz e 50Hz , gera mudanças na estrutura magnética do material que acontecem na escala atômica, gerando transientes magnéticos em frequências superiores a 1kHz , os quais são captados na superfície por uma bobina leitora, localizada entre os polos do yoke. Devido às diferenças entre as frequências de excitação e resposta magnética é possível isolar o RMB mediante a amplificação e o uso de filtros passa-banda. A Figura 16 ilustra um sinal de RMB filtrado entre 1kHz e 150kHz , o qual é posteriormente amplificado aproximadamente cinco mil vezes.

Figura 16 Equipamento para ensaios RMB (a) junto com os sinais de resposta típicos (b)

A variação na amplitude do RMB no laço de histerese durante um ciclo de excitação magnética é ilustrada na Figura 17. Durante o processo, a maior parte dos saltos é produzida pela movimentação irreversível das paredes de domínio de 180° , na medida em que elas se deslocam, ultrapassando os pontos de ancoragem. O RMB é mais pronunciado na parte mais inclinada do laço e diminui de maneira drástica ao alcançar a saturação magnética, pois neste ponto a movimentação de paredes desaparece. Durante o ciclo de histerese magnética, as mudanças na indução no material ocorrem de maneira discreta, sem importar a frequência de magnetização. A localização do máximo de pulsos que compõem o RMB encontra-se pouco antes do campo coercitivo¹⁹.

Figura 17 RMB no laço de histerese magnética associado

3.2 Análise do sinal RMB

O RMB é um sinal com componentes AC aleatórios não estacionários. O sinal geralmente é caracterizado mediante a obtenção de parâmetros seja no domínio do tempo ou da frequência.

3.2.1 Análise no tempo

Embora os sinais periódicos sejam melhor analisados no domínio da frequência, a análise no tempo provê parâmetros importantes para caracterizar o RMB. Mesmo uma análise visual do sinal no tempo é de muita utilidade no processo de medição.

3.2.1.1 RMS

A raiz quadrada do valor quadrático médio, conhecido pelas iniciais do termo em inglês *Root Mean Square*, é um parâmetro estatístico usado para caracterizar a potência de um sinal AC. Este parâmetro escalar é útil para quantificar o sinal RMB em volts. Para cada sinal observado no domínio do tempo, o valor RMS_{RMB} está dado pela expressão:

$$RMS_{RMB} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_m)^2}{n - 1}}, \quad (11)$$

onde:

V_i = valor da voltagem medida para a i -ésima observação;

V_m = valor médio do sinal;

n = número de observações ou pontos (tempo) do sinal.

Como o sinal de RMB é centrado em amplitude, ou seja, tem média zero, o valor RMS é equivalente ao desvio padrão e, portanto, representa uma medida do tamanho médio das flutuações ao redor da média.

3.2.1.2 Energia

Além do valor RMS, a energia do RMB é outro parâmetro comumente usado para caracterizar o sinal de Barkhausen no tempo. Está definida como a integral do quadrado do sinal RMB (V_{RMB}) relativa ao tempo^{20; 21}:

$$Energia_{RMB} = \int (V_{RMB})^2 \cdot dt \quad (12)$$

3.2.1.3 Envolvente

O sinal RMB consiste de componentes de alta frequência cuja variação dinâmica em amplitude acontece com uma frequência muito menor. A curva que modula a amplitude é conhecida como a envolvente do sinal. A forma de descrever a envolvente do RMB é mediante a curva obtida ao unir sequencialmente todos os pontos, entre picos consecutivos, na parte positiva do sinal. O processo da obtenção da envolvente começa com o cálculo do quadrado do RMB para deixar toda a informação na parte positiva do gráfico. Posteriormente o sinal é decimado e mediante o uso de um filtro passa-baixas, os seus componentes de alta frequência são descartados. Para manter o sinal na escala certa, é aplicado um ganho e posteriormente é calculada a raiz quadrada. A Figura 18 ilustra o sinal resultante, o qual constitui a envolvente do RMB.

Figura 18 Envolvente do sinal RMB registrado durante de 1 ciclo de magnetização

A envolvente é relevante na análise dos sinais RMB porque muitas vezes é mais prático inferir parâmetros da forma do sinal tais como a amplitude, ou a posição do pico máximo^{22; 23}. A metodologia descrita para o cálculo da envolvente foi escolhida pela facilidade de processamento para a obtenção do resultado em tempo real, já que o sinal RMB, que consta de um número de pontos na ordem de 10^4 com componentes de frequência entre 2kHz e 200kHz . No entanto existem outras abordagens mais tradicionais, tais como o uso de operações matemáticas como a transformada de Fourier ou a transformada de Hilbert²⁴. Ambos os métodos são amplamente usados, porém devido a seu requerimento computacional, seu uso se ajusta melhor a uma análise off-line.

3.2.2 Análise no domínio da frequência

. Os componentes de frequência do RMB podem ser descritos em termos da densidade espectral de potencia $S(f)$, dada pela transformada de Fourier da sua função de autocorrelação $R(\tau)$, como indicado pela expressão:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (13)$$

Uma visualização simultânea do RMB e a sua densidade espectral de potência, é ilustrada na Figura 19.

Figura 19 Sinal RMB representado no domínio do tempo (a) e da frequência (b)

A análise do RMB no domínio da frequência é uma ferramenta bastante útil tanto para a escolha da faixa de frequência de aquisição de dados, como para a detecção de possíveis interferências eletromagnéticas durante a execução das medições, às vezes difíceis de apreciar no domínio do tempo.

3.3 Fatores que afetam o sinal RMB

O sinal RMB também depende de vários fatores, tais como a amplitude máxima do campo magnetizante, a distância entre os polos do yoke, a sensibilidade da bobina leitora usada, o estado de tensões mecânicas da amostra assim como uma variedade de características microestruturais, que muitas vezes podem mudar simultaneamente. O objetivo desta seção é apresentar brevemente alguns dos principais fatores que afetam o sinal RMB, utilizando referências selecionadas.

3.3.1 Frequência de magnetização

Na seção 2.2 foi estabelecida a relação entre a corrente que circula através de um solenoide e o campo magnético produzido no seu interior. Nesse caso, a corrente circula somente em uma direção, e o campo magnético resultante é estático. Não obstante, quando a corrente reverte a sua direção no tempo, o campo magnético obtido no interior será alternante (dB/dt). Por outro lado, quando um campo magnético alternante entra em um material condutor, como no caso da técnica RMB, um fluxo circular de elétrons é gerado ao redor das linhas de campo entrantes, denominado como *correntes parasitas*. As correntes parasitas, por sua vez geram um campo magnético dentro do material. Este campo sempre se opõe a dB/dt . Desse modo, o campo dB/dt é amortecido dentro do material, atenuando as emissões de RMB. Quanto maior a frequência de excitação magnética, maior o amortecimento.

A amplitude de dB/dt diminui até $1/e$ (onde e é o número de Euler) a uma profundidade δ , dada pela expressão^{2; 25}:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}, \quad (14)$$

onde:

ρ = Resistividade do material

ω = Freqüência angular de excitação ($2\pi f$)

μ_0 = Permeabilidade magnética do vácuo

μ_r = Permeabilidade relativa do material

A profundidade δ é denominada *profundidade de pele*. A Tabela 2 apresenta profundidades de pele, obtidas em função de várias frequências de magnetização, para materiais ferrosos, com valores $\mu_r \approx 50 - 5000$ e $\rho = (1 - 2) \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ (Adaptada de Jiles²⁵).

Tabela 2 Faixa de profundidade de pele relativa à frequência de excitação em materiais ferrosos.

Frequência de excitação (Hz)	Faixa de profundidade δ (mm)
10	0.71-10
50	0.31-4.5
100	0.22-3.2
500	0.1-1.4
1000	0.07-1
5000	0.03-0.45
10000	0.022-0.32
50000	0.010-0.14
100000	0.007-0.10
500000	0.003-0.045

De qualquer forma, a menos que um campo magnético intenso o suficiente, seja aplicado na superfície da amostra com uma frequência de excitação relativamente baixa, os sinais obtidos somente conterão informação das camadas mais próximas da superfície²³.

Moorthy²³, em estudos conduzidos em amostras de aço EN36 (cementado para obter uma porcentagem em peso de Carbono de 0.85% com profundidade de camada de 1mm e posteriormente temperado em óleo desde os 900°C), avaliou o uso de diferentes frequências de magnetização para a detecção de tensões residuais. Foi reportado que o uso de frequências de excitação altas pode ser empregado para avaliar mudanças nas tensões residuais em camadas próximas da superfície do material (profundidade $< 300\mu m$). Entretanto as frequências baixas podem ser usadas para obter informações da distribuição das tensões residuais em camadas mais profundas (profundidade $> 300\mu m$). Em um estudo diferente utilizando o mesmo material, Moorthy²⁶ quantifica tanto a grandeza da frequência magnetização como a profundidade da emissão RMB associada. Neste último trabalho, uma frequência de excitação de 125Hz é definida como alta e uma frequência de excitação de 4Hz como baixa. Usando essas frequências de excitação, foi possível obter informação dos efeitos da têmpera em camadas localizadas a profundidades aproximadas de 100 μm e 425 μm respectivamente. Adicionalmente foi comprovado que a frequência de magnetização tem impacto no nível do RMB obtido. A 4Hz, a faixa de frequência de resposta do RMB esteve entre 10kHz e 2000kHz, no entanto para a magnetização a 125Hz, a frequência de resposta esteve entre 1kHz e 20kHz.

3.3.2 Dureza - Teor de Carbono

No último estudo citado na seção anterior, Moorthy²⁶ comparou a resposta do valor pico do RMB em relação à microdureza resultante em três corpos de prova, o primeiro nas condições do cementado, os outros dois, revenidos utilizando diferentes condições, a 192°C por 2h e a 250°C por 4h. O resultado foi uma tendência linear da diminuição do valor pico do RMB com o aumento da dureza, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 Variação do valor pico do RMB em relação à dureza²⁶

A cementação certamente favorece o endurecimento na superfície das amostras mediante o aumento do teor de carbono. Esta última característica, foi estudada por Capó-Sánchez¹¹, quem utilizando amostras de quatro tipos de aço comercial (1005, 1020, 1045, 1070) reportou que o RMS_{RMB} , em relação ao teor de carbono, não tem um comportamento linear. Este parâmetro aumenta com o teor de carbono, atingindo um máximo para posteriormente sofrer uma queda, como se ilustra na Figura 21. O comportamento inicial, para os aços 1005 e 1020, foi atribuído ao teor de ferrita, que facilita a movimentação dos domínios devido a uma menor densidade de pontos de ancoragem, dessa maneira obtendo um sinal RMB baixo. Na medida em que o teor de carbono aumenta, como no caso do aço 1045, também aumenta a quantidade de perlita no material, acrescentando assim a densidade de pontos de ancoragem. Dessa maneira, o deslocamento das paredes de domínio produz saltos de RMB de maior amplitude. No caso do aço 1070, com o alto teor de perlita a densidade de pontos de ancoragem é maior, porém a energia potencial dos pontos de ancoragem também aumenta, de maneira tal que não podem ser facilmente ultrapassados pelos domínios em deslocamento, produzindo uma queda no sinal RMB.

Figura 21 Variação do RMS_{RMB} em relação ao teor de carbono¹¹

3.3.3 Intensidade de magnetização

Em estudos realizados em aços carbono, Dhar e Atherton²⁷ demonstraram que conforme a intensidade do campo magnético aplicado é aumentada, a voltagem RMS_{RMB} também aumenta, porém atinge um máximo e começa a decrescer e até chegar à saturação magnética, como se ilustra na Figura 22.

Este comportamento foi explicado pelo mecanismo de movimentação de domínios sob a influência de campos magnéticos de baixa intensidade, no qual, na medida em que o campo aumenta, as paredes de domínio atingem a energia suficiente para ultrapassar os pontos de ancoragem. A movimentação de paredes, como indicado na seção 2.5.3, desaparece sob a influência de campos maiores e o mecanismo de magnetização predominante nesse ponto é a rotação de domínios.

Figura 22 Variação do RMS_{RMB} com a intensidade do campo magnético de excitação²⁷

3.3.4 Tamanho de grão

Propriedades microestruturais tais como o tamanho de grão, também influenciam a amplitude do RMB. Tanto Yamaura²⁸ (utilizando aços Fe-3%Si de grão orientado) quanto Pal'a²⁹ (utilizando aços Fe-3%Si de grão não orientado) observaram uma queda no RMS_{RMB} com o aumento do tamanho de grão, como é ilustrado na Figura 23. O comportamento foi atribuído ao fato de que para os grãos mais finos, o número de domínios, e consequentemente de paredes que podem se movimentar, é muito maior do que nas amostras com tamanho de grão maior, promovendo um aumento no nível do RMB.

Figura 23 Variação do RMB em relação ao tamanho de grão^{28; 29}

3.3.5 Medições de tensão mecânica usando RMB

Um material com magnetostricção positiva tende a se alongar quando submetido aos efeitos de um campo magnetizante. O efeito recíproco (*efeito Villari*) faz com que uma tensão de tração aplicada ao material, que tende a alongá-lo, facilite a sua magnetização na direção de aplicação da tensão, enquanto que uma tensão de compressão tenderá a dificultá-la. Isto é devido ao crescimento dos domínios orientados favoravelmente à tensão, como se ilustra na Figura 24, beneficiando o acréscimo da amplitude do RMB. Por outro lado, as tensões de compressão favorecem o crescimento dos domínios magnéticos em direção perpendicular à

tensão aplicada, produzindo uma queda na amplitude do RMB. Dessa maneira, a amplitude do RMB está influenciada pela tensão aplicada e o a orientação do campo magnetizante.

Figura 24 Alinhamento dos domínios magnéticos devido à tração (a) e à compressão (b)

Esta relação entre a tensão aplicada e o RMB foi comprovada experimentalmente em 1970 por Pasley³⁰, cujo trabalho foi o primeiro a ter repercussão na área³¹. Paisley observou a relação entre a amplitude do RMB na superfície de uma viga suspensa de aço HY-80 (sem maiores detalhes na referência) e a tensão induzida na mesma mediante ensaios de flexão. A Figura 25 (Pág. 48) ilustra os resultados experimentais, nos quais foi observado o aumento do nível de RMB para tensões de tração e uma redução na amplitude do RMB para tensões de compressão. No entanto, os experimentos foram conduzidos dentro de um regime de carga bem inferior ao limite de escoamento do material ($80ksi$). Ao longo dos anos, muitos autores, entre outros^{32; 33; 34; 35; 36}, continuaram a reproduzir o comportamento observado por Pasley, no entanto, nem sempre mencionando o sentido de magnetização usado. Presumivelmente a magnetização é aplicada no sentido de laminação (no caso das chapas), extrusão (no caso das barras), ou simplesmente paralela ao sentido de aplicação da tensão.

Figura 25 Variação da amplitude do valor RMB em relação à tensão mecânica uniaxial³⁰

3.4 Anisotropia magnética macroscópica utilizando RMB.

Um dos primeiros autores em reportar medições de RMB magnetizando amostras, submetidas a tensão mecânica, em orientações não paralelas ao sentido da tensão foi Kwun³⁷. Em 1985, ele conduziu experimentos em chapas de vários tipos de aço estrutural, laminadas a quente e recozidas para minimizar os efeitos da tensão residual. A amplitude do RMB foi medida a 0°, 30°, 45°, 60° e 90° em referência ao sentido de aplicação da tensão, para vários patamares de carregamento, indo da compressão à tração dentro do limite de escoamento de cada material. A Figura 26 ilustra os resultados obtidos em uma amostra de aço *ASTM A-36*. Pode ser notado que em condições de carregamento nulo, o RMB medido no material possui uma tendência muito homogênea, quase isotrópica. No entanto esta

tendência desaparece com a aplicação do carregamento, refletindo de maneira macroscópica tanto a tendência de crescimento dos domínios orientados favoravelmente à tração quanto a diminuição dos mesmos no sentido perpendicular ao carregamento de compressão.

Figura 26 Variação da amplitude do RMB em relação ao ângulo de magnetização para vários patamares de carregamento³⁷

Posteriormente, em 1990, Jagadish³⁸, explorou os efeitos do RMB em função do ângulo de aplicação do campo magnético, enquanto que uma seção de aço (2% de Mn) para tubulações (sem maiores detalhes na referência) era submetida tanto a tração como a compressão, usando a montagem experimental ilustrada na Figura 27a. Mediante o deslocamento da prensa móvel foram induzidos estados de tração e de compressão na superfície do tubo (dentro do limite elástico). No sistema de referência escolhido, a direção axial do tubo corresponde ao eixo $0^\circ - 180^\circ$, enquanto que a direção circunferencial do mesmo (sentido de indução da tensão) corresponde ao eixo $90^\circ - 270^\circ$.

Na Figura 27b, pode ser notado que para o estado de tensão nula, existe uma anisotropia magnética orientada no sentido axial do tubo, provavelmente resultado do processo de fabricação. Na medida em que a tração foi induzida, houve

mudanças na anisotropia magnética, sendo que no final do processo o valor do RMB máximo corresponde a uma orientação de 50° - 230° , com a tendência de girar para se reorientar no sentido da tensão máxima. Embora não tenha sido notado no trabalho, a dificuldade que a anisotropia magnética teve para se reorientar completamente paralela ao sentido da tração, provavelmente é devida à presença de uma forte anisotropia magnética inicial.

A Figura 27c apresenta os resultados com tensões de compressão, onde a amplitude da anisotropia magnética diminui levemente sem se reorientar já que a tensão mecânica induzida gera um estado de anisotropia paralelo à anisotropia inicial. As variações do RMB com a tensão, até o momento, foram apresentadas no sistema de coordenadas cartesiano, já que na época não era costumeira a representação polar encontrada em trabalhos posteriores.

Figura 27 Montagem experimental (a) para avaliar a variação angular do RMB relativas à tração (b) e à compressão (c) em tubulações de aço³⁸

Em contraste, Gauthier⁸ corroborou a influência da anisotropia magnética inicial em medições de RMB efetuadas em uma viga de aço estrutural laminada a frio, com 4mm de espessura (sem maiores detalhes na referência). A Figura 28a ilustra os resultados experimentais de medições feitas tanto na superfície exterior quanto na superfície interior quando a viga foi submetida a tensões uniaxiais tanto de tração como de compressão. Pode-se observar que mesmo se a tendência da $Energia_{RMB}$ é de aumentar na tração e diminuir na compressão, os comportamentos são substancialmente diferentes em ambas as superfícies. A Figura 28b ilustra as medições angulares de RMB, em cada uma das superfícies, em condições de carregamento externo nulo, confirmando a existência de diferenças na anisotropia magnética (representadas por meio de coordenadas polares ao invés de cartesianas). Estas diferenças são atribuídas às tensões residuais resultantes de processos tais como a laminação e o corte. Observando as distribuições de anisotropia magnética em ambas as superfícies, a distribuição medida na superfície interior está praticamente perpendicular à da superfície exterior, além de possuir uma área menor, o que pode refletir um estado de tensão residual de compressão. Estes resultados deixam em evidência a importância de conhecer a distribuição de anisotropia magnética antes de realizar um ensaio de tensão uniaxial. Os resultados utilizando magnetização unidirecional paralela à direção de laminação (DL), não possuem o comportamento aproximadamente linear esperado, sendo afetados pela reorientação da anisotropia magnética inicial, induzida pelo processo de carregamento.

Figura 28 Variação da $Energia_{RMB}$ relativa à tensão uniaxial em ambas as superfícies da amostra (a) junto com as medições angulares respectivas para um nível fixo de carregamento (b)⁸

Segundo as observações experimentais de Clampham³⁹, as diferenças angulares dos parâmetros descritivos do RMB em relação à tensão mecânica aplicada, são originadas pela aparição de um *eixo de fácil magnetização* (ou simplesmente, *eixo fácil*) na direção de aplicação da tensão. Este eixo aparece devido a uma reorientação dos domínios de 180° com a direção da mesma, acrescentando a população de domínios de 180° que já estavam orientados de maneira favorável com a tensão. Clampham³⁹, corroborou que o eixo fácil tem uma relação muito mais estreita com o estado de tensões do que com a textura e/ou a microestrutura em tubulações de aço. Estas tubulações são fabricadas utilizando chapas de aço (sem maiores detalhes na referência) laminadas a quente, recozidas, deformadas plasticamente para obter uma forma cilíndrica e posteriormente soldadas. Foi feita uma análise de textura mediante difração de raios-x, indicando uma distribuição preferencial das direções <100> escassa ou nula. Posteriormente, foram efetuadas medições angulares de RMB antes e depois de realizar um tratamento térmico a uma temperatura insuficiente para alterar a textura, promover mudanças de fase ou iniciar a recristalização. Sem embargo a temperatura foi suficiente para reduzir a energia de deformação da célula unitária. Os resultados, ilustrados na Figura 29, comprovam que depois do tratamento térmico a tendência angular do RMB é isotrópica. A presença inicial do eixo fácil é atribuída a estados de tensão residual, induzidos durante a deformação em frio para conformar a tubulação.

Figura 29 Distribuição da anisotropia magnética antes e depois do recozido³⁹

A representação polar da distribuição angular do RMB, não é útil somente para identificar estados de tensão residual. A técnica, utilizada por autores tais como Krause⁴⁰ e mais recentemente no LADIN, por Capó-Sánchez⁴¹, também permite acompanhar de forma mais clara (em comparação com a Figura 26 e a Figura 27) as mudanças da anisotropia magnética, induzidas pela tensão mecânica aplicada. Capó-Sánchez⁴¹ detalhou a evolução da distribuição angular do RMB em relação a uma tensão de tração aplicada de maneira uniaxial. A Figura 30 detalha os resultados de experimentos realizados utilizando uma amostra de aço ASTM 36 (espessura de 1.2mm, laminado a frio).

Figura 30 Representação polar da variação das medições angulares de RMB relativas à tração⁴¹

As linhas contínuas entre os pontos de medição na Figura 30 são os resultados de um ajuste obtido previamente por Krause^{20; 42}, quem popularizou a apresentação das medições angulares de RMB de maneira polar. O ajuste, além de ser usado para suavizar as medições obtidas, é usado para caracterizar a $Energia_{RMB}$ em função dos parâmetros dados pela expressão:

$$Energia_{RMB} = \alpha \cdot \cos^2(\theta + \varphi) + \beta, \quad (15)$$

onde α e β são os parâmetros de ajuste enquanto θ é o ângulo entre o campo aplicado e o eixo fácil (ϕ). Foi estabelecido que o parâmetro β é proporcional ao RMB devido aos componentes isotrópicos presentes na amostra, enquanto α é um excesso de RMB produzido pela movimentação irreversível das paredes de domínio de 180° que contribuem com o eixo de fácil magnetização. Mandache⁴³, em experimentos utilizando uma chapa com 2.8mm de espessura, de aço de baixo carbono laminado a quente (sem maiores detalhes na referência), registrou o comportamento dos parâmetros $Energia_{RMB}$, α , β e ϕ , durante um ensaio de tração (Figura 31). Neste caso, antes de começar o ensaio, a amostra apresentava um ϕ na direção transversal ao sentido do carregamento. No entanto, com o acréscimo da tração, ϕ foi se orientando em sentido paralelo à mesma. Durante a reorientação de ϕ , o ponto com a tendência mais isotrópica correspondeu a $\sigma = 60\text{MPa}$. A $Energia_{RMB}$ teve a tendência de aumentar durante todo o processo devido à reorientação dos domínios de 180° orientados favoravelmente ao sentido da tração.

Figura 31 Evolução dos parâmetros de ajuste da equação (15) em relação à tração⁴³

A utilização das medições angulares de RMB constitui uma excelente ferramenta para a detecção de estados de tensão mecânica, tanto aplicada quanto residual. No entanto, os resultados são comumente obtidos em condições controladas de laboratório. A utilização desse método em campo para monitorar dinamicamente mudanças de tensão é pouco viável, já que o procedimento de medição é demorado e propenso ao erro (dado que envolve a constante manipulação da sonda RMB) e requer um processamento *off-line*.

3.5 Barkhausen Contínuo

Todas as aplicações descritas na seção anterior foram efetuadas utilizando a metodologia clássica da técnica RMB, na qual um eletroímã produz uma magnetização alternante entre os seus polos enquanto uma bobina leitora é fixada sobre a superfície do material para captar a resposta magnética do mesmo.

No entanto, a variação do campo magnético para a geração de RMB não está limitada aos eletroímãs de campo alternante, como foi demonstrado em 2004 por Crouch⁴⁴, quem introduziu uma metodologia de medição a qual denominou *Barkhausen contínuo*. Esta técnica foi aplicada à inspeção de defeitos mecânicos em tubulações de aço. Segundo Crouch⁴⁴, os eletroímãs, capazes de gerar um campo magnético externo fixo, ao serem movimentados sobre um material ferromagnético provocam um fluxo magnético com magnitude e direção variável nas proximidades de seu volume (Figura 32a). Estas variações geram uma alteração na estrutura de domínios magnéticos do material. Mediante a utilização de uma bobina leitora que se desloca junto com o ímã é possível obter sinais RMB. A localização da bobina leitora foi escolhida baseada em uma análise por elementos finitos. A sonda de Barkhausen contínuo, constituída pelo conjunto do eletroímã e a bobina, foi usada para fazer um mapeamento com o objetivo de identificar regiões de deformação plástica criadas artificialmente ao longo de uma tubulação de aço. A identificação foi feita usando o sinal de Barkhausen contínuo registrado durante o mapeamento (Figura 32b).

Figura 32 Esquemático do dispositivo usado por Crouch⁴⁴ (a) para a obtenção de sinais de RMB contínuo (b)

Embora tenha sido uma prova de conceito, os experimentos indicaram fenômenos como as mudanças na amplitude do sinal de até 45% com relação às variações na velocidade de deslocamento de até 150%. Foi observada uma dependência proporcional entre a magnitude do campo utilizado e a amplitude do RMB obtido. Além disso, foi notado que as variações do espaçamento entre a sonda e o material (em inglês denominado *lift-off*) ao longo da distância de medição, têm grande impacto na qualidade do sinal obtido. O método foi patenteado nos EUA conforme o número 7.038.444, em 2/05/2006⁴⁵.

O princípio do Barkhausen contínuo foi posteriormente utilizado por Franco⁴⁶ na sua tese de doutorado, corroborando algumas das observações de Crouch⁴⁴, tais como o efeito da velocidade e a intensidade do campo na qualidade do RMB obtido. No trabalho, foi projetada uma sonda composta por um par de ímãs permanentes em conjunto com uma bobina, cuja localização foi escolhida com base em simulações por elementos finitos (Figura 33).

Figura 33 Sonda de RMB contínuo projetada por Franco⁴⁶

A sonda foi utilizada em um conjunto de experimentos, considerados como preliminares devido às lacunas conceituais ao redor da técnica, que envolviam a identificação de aços com diferentes composições químicas, diferentes níveis de descarbonetação, a detecção de deformações plásticas, a detecção de falhas volumétricas e o mapeamento de tensões mecânicas. A Figura 34 ilustra um exemplo dos resultados de um mapeamento de defeitos volumétricos, os quais foram posteriormente publicados⁴⁷.

Este trabalho, desenvolvido no LADIN, foi um importante avanço nesta técnica, até o momento, pouco estudada. O trabalho explorou novas aplicações, superando no processo muitos problemas de estabilidade. A técnica, ainda que continue em um estágio de desenvolvimento, oferece uma alternativa promissória para aplicações na indústria.

Figura 34 Sinal de RMB contínuo usado na detecção defeitos volumétricos (esq.) junto com o RMS_{RMB} (dir.)⁴⁶

4 O método RMB Contínuo rotacional

4.1 Introdução

Como foi exposto no capítulo anterior, o RMB é uma técnica bastante versátil, sensível, porém, unicamente a alterações originadas nas camadas mais superficiais do material. As informações resultantes das medições tradicionais de RMB unidirecional são complementadas mediante o uso da técnica de medição angular do RMB. Esta última técnica permite identificar tanto a presença de tensões residuais quanto acompanhar o efeito das tensões mecânicas aplicadas, mediante a calibração da distribuição de anisotropia magnética resultante. No entanto, esse processo de medição implica em procedimentos de calibração demorados e pouco práticos, inviabilizando o seu uso como método não-destrutivo de monitoramento de tensões mecânicas e deixando de lado uma potencial aplicação ainda mais relevante, o monitoramento de tensões biaxiais.

Dado que a precisão dos resultados obtidos mediante a técnica de medição angular do RMB depende fortemente do posicionamento da sonda, alguns autores resolveram superar essa dificuldade mediante o uso de uma sonda estática composta por dois pares de polos, dispostos ortogonalmente. Cada polo possui uma bobina magnetizante independente e o campo resultante é obtido mediante a manipulação simultânea das correntes que circulam por cada uma delas. Um exemplo deste tipo de sonda é o dispositivo denominado *Introscan* (Figura 35), utilizado por Vengrinovich⁴⁸ em 2004 para realizar medições angulares de RMB. No entanto, tanto os resultados quanto o funcionamento do aparelho, não são explicados detalhadamente.

Figura 35 Dispositivo usado por Vengrinovich⁴⁸ para realizar medições angulares de RMB

Recentemente White⁴⁹, usou uma técnica similar para a calibração de parâmetros escalares derivados do RMB em relação à tensão resultante em ensaios flexão realizados em tubos de reator nuclear. Diferentemente do Introsan, a sonda projetada por White⁴⁹ está composta por dois yokes ortogonais. O resultado é um campo magnético unidirecional obtido usando um complexo sistema de controle para gerar combinações de corrente nas bobinas magnetizantes. Este campo é aplicado em incrementos angulares, imitando a metodologia utilizada com o RMB clássico. A técnica provavelmente diminui o tempo para completar um conjunto de medições angulares tradicionais, porém, a duração de cada medição não foi divulgada.

Uma década antes de Vengrinovich, Enokizono⁵⁰ tinha usado o princípio dos eletroímãs ortogonais para gerar um campo magnético girante, obtendo um sinal RMB no processo, denominando esta metodologia de *RMB rotacional*. O sinal obtido foi relacionado com a evolução de um processo de fadiga térmica experimentado por uma seção de tubo de caldeira utilizado em usinas nucleares. Embora a técnica tenha sido posteriormente usada em outros experimentos^{51; 52; 53}, além das medições não terem nenhuma relação com medições de anisotropia magnética, em todos os casos o sensor usado estava composto por dois cabeçotes magnéticos ortogonais, utilizados para a medição das componentes do fluxo magnético na superfície da amostra.

Neste trabalho, durante o estudo da estabilidade RMB contínuo para o mapeamento linear de superfícies, foi notado que o RMB obtido em diferentes amostras de aço mediante a utilização de um par de ímãs permanentes girando em velocidade constante ao redor de uma bobina leitora, além de ser contínuo, apresentava padrões periódicos. Nestas amostras, a anisotropia magnética tinha sido previamente medida utilizando a técnica RMB clássica. A periodicidade deste novo sinal, denominado RMB contínuo rotacional (RMBCR), começou a ser estudada para encontrar uma possível conexão com a anisotropia magnética.

Para poder estabelecer uma comparação entre ambas as técnicas, foi necessário formular uma metodologia para a obtenção e processamento do sinal RMBCR. Devido ao fato da técnica ser inédita, as condições experimentais ótimas foram encontradas de maneira empírica.

Os resultados das medições feitas por meio do RMBCR foram comparados com as medições angulares de RMB clássico, concluindo que o RMBCR pode ser

utilizado tanto para detectar a distribuição de anisotropia magnética quanto para identificar a orientação do eixo fácil. Adicionalmente, houve uma formulação de parâmetros derivados do sinal RMBCR para a quantificação da anisotropia magnética. As observações experimentais relatadas neste capítulo foram publicadas na primeira edição do volume 45 da revista *NDT&E International* no artigo intitulado “Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method”⁵⁴

4.2 Materiais e métodos

Foram efetuadas medições angulares de RMB clássico, em um conjunto de 3 amostras de aço inox ferrítico comercial de 290mm x 214mm x 0.5mm, em estado “como recebidas” (Tabela 3), com o objetivo de encontrar as suas distribuições de anisotropia magnética e utilizá-las como padrão de comparação para as medições de RMBCR. As medições angulares de RMB clássico foram efetuadas obtendo a $Energia_{RMB}$ em intervalos de 15°. Os 24 pontos resultantes foram interpolados usando a expressão (15).

Tabela 3 Características das amostras usadas nos experimentos

Amostra	Material	Porcentagem em massa do elemento							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
1	AISI 430	0.120	1.000	1.000	0.040	0.030	16.000	0.750	--
2	AISI 439	0.030	1.000	1.000	0.040	0.030	17.000	0.500	--
3	AISI 444	0.025	1.000	1.000	0.040	0.030	17.500	1.000	1.750

A configuração experimental do RMBCR utiliza uma bobina leitora situada na superfície da amostra, onde a fonte de excitação contínua é provida por um par de ímãs permanentes, cada um deles localizado nos extremos opostos de um núcleo laminado de Fe-Si. O núcleo é montado em um dispositivo rotativo para gerar um campo magnético girante na superfície da amostra, necessário para obter o RMB. O espaçamento entre os ímãs e a amostra foi escolhido de maneira tal que não houvesse contato entre eles. Utilizando uma frequência de giro de 8.5 Hz, foram obtidos sinais com amplitudes comparáveis às observadas utilizando RMB clássico em condições de amplificação semelhantes, no mesmo material. Um sensor hall é colocado na superfície da amostra, localizado na trajetória circular descrita pelos

ímãs, provendo um sinal utilizado como referência de giro. O esquema do dispositivo experimental é ilustrado na Figura 36a. Todos os experimentos foram realizados utilizando o sistema de referência angular ilustrado na Figura 36b, o qual foi marcado na superfície das três amostras.

Figura 36 Esquema da sonda de RMBCR

A Figura 37 apresenta um exemplo dos sinais obtidos utilizando a sonda de RMBCR durante uma medição de aproximadamente dois e meio ciclos de rotação dos ímãs sobre a amostra 1. O primeiro é um sinal RMB que aparece de maneira contínua, apresentando uma variação cíclica aparentemente relacionada com a rotação. O segundo é um sinal de referência que está relacionado à amplitude da excitação magnética detectada pelo sensor Hall ao longo do tempo. Dois máximos (ou mínimos) consecutivos do sinal de referência permitem identificar uma única rotação, durante a qual parecem existir duas direções, que favorecem o aumento da amplitude da resposta magnética. Estas direções devem estar relacionadas à anisotropia magnética e consequentemente ao eixo de fácil magnetização.

Figura 37 Sinal típico obtido usando a sonda RMBCR

No entanto, para descobrir a direção na qual o sinal RMBCR apresenta a maior amplitude, deve ser estabelecido um procedimento para corrigir a sua possível

defasagem em relação ao sinal de referência, de maneira que possa ser obtida a direção do eixo de fácil magnetização.

O processo é mostrado esquematicamente na Figura 38a (Pág. 63); onde, analisando os sinais registrados durante uma rotação, é possível identificar cinco pontos relevantes.

No ponto 1, (Figura 38b) o processo começa com os ímãs, magnetizando uma pequena região na superfície, paralela ao eixo fácil (Figura 38c), o sensor RMB localizado no centro de rotação e o sensor Hall posicionado a 0° em relação ao eixo fácil.

Conforme a rotação avança, o sinal de referência indica como a magnetização na região da Figura 38c é gradativamente invertida, do ponto 1 até o ponto 3. Durante este processo, quando a magnetização muda de polaridade, nas proximidades do ponto 2, a bobina leitora detecta um acréscimo repentino de pulsos RMB, o qual diminui quando os ímãs completam meio giro, nas proximidades do ponto 3.

Do ponto 3 ao ponto 5 o processo é semelhante ao processo entre o ponto 1 e o ponto 3, somente que há inversão da polaridade magnética. Novamente, a bobina detecta um aumento de atividades na proximidade do ponto 4. No ponto 5 os ímãs chegam a sua posição original e o padrão da emissão do RMBCR para uma rotação completa, é obtido.

Pode ser observado que o máximo nível de emissão RMBCR (pontos 2 e 4) tem uma defasagem de 90° em relação à orientação do eixo fácil (pontos 1, 3 e 5).

Ao utilizar a sonda RMBCR em uma amostra desconhecida, é muito provável que o sensor Hall fique em uma orientação aleatória, gerando uma defasagem entre o RMBCR e o sinal de referência, como no exemplo ilustrado na Figura 39a (Pág 63). Neste caso o sensor Hall está posicionado aproximadamente a 90° do eixo fácil. A defasagem em relação ao padrão de emissão de RMBCR (Figura 38), então pode ser corrigida alterando a posição do sensor Hall. Este devera ser deslocado até que o angulo entre ele e o eixo fácil seja 0° , como ilustrado na Figura 39b.

Figura 38 Padrão de emissão de RMBCR de uma rotação completa para a identificação do eixo fácil (a). Representação esquemática da rotação dos ímãs (b) sobre uma região de alinhada com o eixo de fácil magnetização (c)

Figura 39 Sincronização com o padrão de emissão RMBCR: Primeiramente, o sensor hall é localizado aleatoriamente na amostra (a) gerando o sinal de referência de giro (b), subsequentemente a sonda é deslocada (c) até que o sinal de referência (d) corresponda com o padrão de rotação da Figura 38

Uma vez que o padrão de emissão de RMBCR é alcançado, a orientação do eixo fácil é encontrada. No entanto, o sinal RMBCR é processado para obter a distribuição de anisotropia magnética correspondente a uma rotação.

Primeiramente, como se ilustra na Figura 40a, a envolvente do sinal RMBCR é calculada. Na Figura 40b, um segmento do sinal RMBCR e a sua envolvente, correspondentes a um ciclo de rotação, são isolados. Este segmento de sinal é

grafado contra o ângulo de rotação ao invés do tempo, usando os três picos do sinal do sensor Hall como referência. Na Figura 40c, o segmento do sinal é desfasado 90° e representado graficamente em uma forma mais familiar, um mapa polar no qual o raio representa a amplitude do envelope em Volts. A representação polar é o padrão de apresentação de dados usado pelo método RMBCR.

O ângulo de 0° faz referência à orientação do sensor hall em relação ao eixo fácil, no entanto, uma vez que a orientação do mesmo é identificada, pode-se adoptar um sistema de referência arbitrário na superfície da amostra, como por exemplo, o sistema definido na Figura 36b.

Figura 40 Processamento do sinal: Inicialmente a envolvente do RMBCR é calculada (a), em seguida um ciclo de rotação é isolado e grafado contra o ângulo de rotação (linha descontinua indica a direção perpendicular ao eixo fácil) (b) e finalmente é desfasado 90° e representado de forma polar (c)

4.3 Resultados

Na seguinte subsecção são apresentados os resultados obtidos para cada uma das amostras mediante o uso de ambos os métodos. As distribuições de anisotropia magnética resultantes foram normalizadas para facilidade na comparação entre técnicas.

4.3.1 Resultados baseados nos parâmetros α e β .

Os parâmetros α e β , correspondentes ao ajuste apresentado na equação 15, além de ser calculados utilizando os resultados das medições angulares de RMB clássico, também foram calculados a partir das distribuições de anisotropia magnética obtidas usando o RMBCR. Isto, com o objetivo de calcular o coeficiente de correlação entre eles para saber o quão distantes estão os ajustes obtidos usando os dois métodos.

A Figura 41a apresenta os resultados para a amostra 1, consistindo de 24 medições e o seu respectivo ajuste. Apesar de que ajuste obtido indica claramente a direção do eixo de fácil magnetização, a sua forma não se parece com a forma resultante da ligação dos pontos experimentais.

Posteriormente, são apresentados os resultados das medições usando o método RMBCR; a Figura 41b apresenta o a distribuição de anisotropia magnética junto com o ajuste. Do mesmo modo, o ajuste tem uma forma notavelmente diferente da distribuição de anisotropia magnética. Neste caso, o eixo fácil corresponde com a marca de 90° na amostra.

Figura 41 Resultados das medições na amostra 1 usando tanto o método RMB clássico (esq.) quanto o método RMBCR (dir.), o ajuste foi calculado para ambos os resultados.

Embora os resultados qualitativos de ambos os métodos sejam muito parecidos, os ajustes foram calculados para ter uma noção da proximidade dos parâmetros α , β e ϕ , obtidos mediante ambas as técnicas. A Tabela 4 apresenta os parâmetros resultantes e a diferença percentual entre eles.

Tabela 4 Parâmetros de ajuste obtidos na amostra 1 usando ambas as técnicas

Parâmetro	Resultados das medições estáticas	Resultados das medições dinâmicas	Diferença porcentual
α	0.697	0.644	4.733%
β	0.214	0.229	7.006%
φ	90°	90°	0.000%

Não obstante, é mais relevante saber que tão parecidas são as formas da distribuição de anisotropia magnética. A Figura 42 apresenta a superposição dos mapas polares obtidos utilizando ambas as técnicas, ficando em evidência o alto grau de similitude entre eles. Para quantificar a diferença, foi calculado o coeficiente de correlação entre eles, obtendo um valor de 0.9927. A amostra apresenta uma notável anisotropia magnética, com uma orientação de 90°.

Figura 42 Comparação entre os resultados normalizados obtidos usando ambas as técnicas na amostra 1

A mesma metodologia de medição e análise é conduzida para as medições na amostra 2. A Figura 43 apresenta os resultados obtidos e os respectivos ajustes. Mais uma vez existe uma grande similaridade entre as distribuições de anisotropia magnética.

Figura 43 Resultados das medições na amostra 2 usando tanto o método RMB clássico (esq.) quanto o método RMBCR (dir.), o ajuste foi calculado para ambos os resultados

A Tabela 5 apresenta os parâmetros de ajuste usado ambas as técnicas na amostra 2, bem como a diferença percentual entre eles.

Tabela 5 Parâmetros de ajuste obtidos na amostra 2 usando ambas as técnicas

Parâmetro	Resultados das medições estáticas	Resultados das medições dinâmicas	Diferença percentual
α	0.423	0.343	20.841%
β	0.564	0.630	11.079%
φ	90°	90°	0.000%

A Figura 44 apresenta graficamente a comparação entre as distribuições de anisotropia magnética normalizadas, obtidas usando ambas as técnicas na amostra 2. O coeficiente de correlação obtido foi de 0.9849. Apesar de não ser tão pronunciada quanto a anisotropia magnética da amostra 1, a amostra 2 também apresentou um eixo de fácil magnetização bem definido, orientado a 90°.

A Figura 45 apresenta as distribuições de anisotropia magnética medidas na amostra 3 assim como os seus respectivos ajustes. Tal como aconteceu com a amostra 2, a forma dos gráficos possui um alto grau de semelhança.

Tabela 6 apresenta os parâmetros de ajuste obtidos usando ambas as técnicas na amostra 3, bem como a diferença percentual entre elas.

Tabela 6 Parâmetros de ajuste obtidos na amostra 3 usando ambas as técnicas

Parâmetro	Resultados das medições estáticas	Resultados das medições dinâmicas	Diferença porcentual
α	0.282	0.262	7.328%
β	0.681	0.708	3.918%
φ	3.063°	3.016°	1.550%

Figura 44 Comparação entre os resultados normalizados obtidos por ambas as técnicas na amostra 2

Figura 45 Resultados das medições na amostra 3 usando tanto o método RMB clássico (esq.) quanto o método RMBCR (dir.), o ajuste foi calculado para ambos os resultados.

A Figura 46 apresenta uma comparação gráfica dos resultados normalizados usando ambas as técnicas na amostra 3, obtendo um coeficiente de correlação de 0.9328. Nesta ocasião, o eixo de fácil magnetização foi identificado pelas duas técnicas, possuindo uma orientação de 3° em sentido horário.

Figura 46 Comparação entre os resultados normalizados obtidos por ambas as técnicas na amostra 3

Embora os resultados tenham sido comparados quantitativamente, mediante uma simples inspeção visual da Figura 42, a Figura 44 e a Figura 46, é possível apreciar o alto nível semelhança entre as distribuições de anisotropia magnética obtidas usando tanto o RMBCR quanto o RMB clássico.

4.4 Um conjunto de parâmetros alternativos para as medições usando o método RMBCR.

Neste item é proposto um conjunto de parâmetros obtidos da análise dos resultados do método RMBCR.

Dado que as medições discretas usando a técnica clássica RMB resultam em um conjunto de uns poucos pontos, é desejável o uso de um ajuste que contribua na visualização dos resultados para posteriormente inferir algumas características do material.

Para a técnica do RMBCR, o número de pontos que descrevem a distribuição de anisotropia magnética, está usualmente na ordem de 10^3 , tornando a medição praticamente contínua, fazendo desnecessário o uso de um ajuste e a determinação de α e β . Portanto, é proposto um conjunto de novos parâmetros dedicados à caracterização dos sinais RMBC.

O sinal usado como exemplo para definir o conjunto de parâmetros é ilustrado na Figura 47. Os cálculos são baseados em um ciclo de rotação. Propõem-se os seguintes parâmetros:

- A *Energia Total*_{RMB de rotação}: Definida com a integral relativa ao tempo do quadrado da envolvente do sinal de voltagem RMB para um ciclo de rotação.

$$Energia\ Total_{RMB\ de\ rotação} = \int_{t(0^{\circ})}^{t(360^{\circ})} (RMB_{Env})^2 dt$$

- A fronteira de anisotropia magnética: A linha definida pela média dos mínimos da envolvente da voltagem RMB, a qual estabelece o limite entre a parte do sinal que pode ser atribuído ao comportamento anisotrópico (parte superior) e o RMB no fundo, associado com o conteúdo isotrópico (parte inferior).
- A *Energia Isotrópica*_{RMB de rotação}: Definida como a integral relativa ao tempo da região delimitada pela fronteira de anisotropia magnética.

$$Energia\ Isotrópica_{RMB\ de\ rotação} = \int_{t(0^{\circ})}^{t(360^{\circ})} \left(\frac{1}{n} \sum_{1}^n \text{Mínimos Locais}_{RMB^2(env)} \right) dt$$

- A *Energia Anisotrópica*_{RMB de rotação}: Definida como a diferença entre a *Energia Total*_{RMB de rotação} e a *Energia Isotrópica*_{RMB de rotação}.
- A *Relação RMB*_{conteúdo de energia isotrópica}: Definida como a proporção entre a *Energia Isotrópica*_{RMB de rotação} e a *Energia Total*_{RMB de rotação}.
- A *Relação RMB*_{conteúdo de energia anisotrópica}: Definida como a relação entre a *Energia Anisotrópica*_{RMB de rotação} e a *Energia*_{RMB de rotação}.

Os últimos dois parâmetros são denominados de “*parâmetros percentuais*” já que o seu valor é expressado como uma porcentagem, diferentemente dos outros parâmetros, denominados de “*parâmetros de energia*”.

Figura 47 Sinal usado para inferir o conjunto de parâmetros, correspondente a um fragmento do quadrado da envolvente de um ciclo de rotação junto com a linha que define a fronteira de anisotropia magnética.

Estes parâmetros propostos foram calculados para cada uma das amostras. Mediante o uso dos mesmos, foi possível uma comparação quantitativa entre os níveis de anisotropia magnética associada a cada uma delas. O conjunto completo de resultados é apresentado na Tabela 7, onde é possível identificar diferentes níveis percentuais de anisotropia magnética no processo de identificação da direção do eixo de fácil magnetização.

Tabela 7 Conjunto de novos parâmetros obtidos para cada uma das 3 amostras

Parâmetro	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
$Energia\ Total_{RMB\ de\ rotação} (V^2 \cdot s)$	0.116	0.067	0.041
$Energia\ Isotrópica_{RMB\ de\ rotação} (V^2 \cdot s)$	0.060	0.053	0.036
$Energia\ Anisotrópica_{RMB\ de\ rotação} (V^2 \cdot s)$	0.056	0.014	0.005
$Relação\ RMB_{conteúdo\ de\ energia\ isotrópica} (\%)$	51.944	79.259	87.715
$Relação\ RMB_{conteúdo\ de\ energia\ anisotrópica} (\%)$	48.056	20.741	12.285

4.5 Interpretação

Os resultados obtidos usando a técnica RMBCR possuem uma alta resolução angular quando comparados com os resultados obtidos mediante o uso do RMB clássico. Além disso, a técnica do RMBCR permite que as medições sejam realizadas em poucos décimos de segundo. Este tempo contrasta com os 15 minutos em média necessários para obter e processar os sinais resultantes de 24 medições estáticas usando o RMB clássico, as quais, dependendo da perícia do usuário, podem levar um tempo maior.

As medições foram realizadas localizando a sonda RMBCR no centro das amostras com o objetivo de minimizar qualquer efeito na anisotropia magnética induzido pela forma. Uma vez que os sinais RMBCR e de referência foram sincronizados conforme o padrão de emissão RMBCR, a magnetização foi aplicada tanto em sentido horário quanto anti-horário sem apresentar alguma defasagem perceptível entre os sinais.

4.6 Conclusões

Neste capítulo foi introduzida uma nova técnica denominada RMBCR, a qual foi usada de maneira mais que satisfatória para realizar medições de anisotropia magnética de uma maneira mais rápida, simples e prática em comparação com o RMB clássico. Tanto a distribuição de anisotropia magnética, de alta resolução angular, quanto o eixo fácil são detectadas em décimos de segundo.

Os mapas de anisotropia magnética obtidos usando RMB clássico podem ser interpretados como um subconjunto das medições usando o RMBCR.

Um novo conjunto de parâmetros foi proposto para caracterizar os sinais de RMBCR. Estes permitem quantificar o conteúdo de anisotropia magnética em termos da $Energia_{RMB}$, tornando possível uma comparação mais simples entre amostras diferentes. Foi possível observar que para a amostra 1, aproximadamente 50% da energia do sinal estava relacionado com a anisotropia magnética. Para a amostra 2, proporção foi aproximadamente 20% e para a amostra 3 foi aproximadamente 10%.

A técnica proposta provê as bases para o desenvolvimento de novas aplicações baseadas no monitoramento em tempo real das mudanças de anisotropia magnética

como, por exemplo, as originadas por tensões mecânicas variáveis em peças estruturais. Outra aplicação poderia ser o mapeamento de superfícies em alta velocidade, onde as mudanças de anisotropia magnética poderiam ser relacionadas a estados de tensão mecânica, seja residual ou aplicada.

É relevante notar que o uso de ímãs permanentes, elimina a necessidade de fontes de corrente no equipamento RMB, fazendo com que o consumo energético do mesmo seja consideravelmente baixo.

5 Observações experimentais derivadas do RMB produzido por meio da magnetização rotacional

5.1 Introdução

O método RMBCR apresentado no capítulo anterior foi pensado como uma maneira de superar as limitações das medições angulares de RMB clássico com o objetivo de explorar novas aplicações das medições de anisotropia magnética. Isto foi possível substituindo a abordagem tradicional de magnetização alternante unidirecional aplicada em acréscimos angulares ao redor do mesmo ponto, por uma magnetização rotacional utilizando ímãs permanentes (campo magnético fixo).

No entanto, a magnetização rotacional não é um processo comumente associado aos métodos END e sim a núcleos de transformadores e equipamentos rotativos, por exemplo. Neste último tipo de aplicação, toda vez que material do núcleo começa a girar, sob os efeitos de um campo magnético gerado por ímãs permanentes, seus domínios tendem a se alinhar constantemente ao campo. Este processo de reorganização de domínios no núcleo vem acompanhado por um atrito magnético que gera perdas no processo de magnetização, as quais, como mencionado na seção 2.5.4, são refletidas pela área dentro do laço de histerese magnética do material. Eventualmente o atrito se transforma em calor, podendo alterar drasticamente as propriedades, tanto do núcleo como dos seus enrolamentos. Os aços utilizados neste tipo de aplicações são conhecidos como aços elétricos, e geralmente são processados para minimizar as perdas por histerese.

Como foi notado no capítulo anterior, as condições experimentais ótimas utilizadas no desenvolvimento da metodologia RMBCR foram encontradas de maneira empírica. No entanto, uma vez que o RMBCR tinha sido desenvolvido e começava a ser aplicado em materiais e condições diferentes, o processo para encontrar os parâmetros experimentais ótimos foi deixando em evidência algumas ocorrências que não tinham sido observadas previamente. Estas observações foram explicadas com base em estudos de perdas por histerese, que embora sejam diferentes ao método RMBCR, fazem uso da magnetização rotacional.

5.2 Dispositivos para magnetização rotacional

Na literatura, é comum encontrar dispositivos para magnetização bi dimensionais de aços elétricos, cujo objetivo comumente é avaliar, de maneira não destrutiva, os efeitos da anisotropia e quantificar as perdas por histerese. Diferente do método RMBCR, estes dispositivos utilizam arranjos de eletroímãs como meio de magnetização, de modo semelhante ao dispositivo de Vengrinovich⁴⁸ (Figura 35). A corrente que circula por cada bobina é manipulada para magnetizar a amostra em uma determinada direção, ou para gerar padrões de rotação de campo magnético, usualmente elípticos ou circulares. Estes dispositivos têm a capacidade, não somente de gerar magnetização rotacional como também de registrar os sinais necessários para construir laços de histerese. A Figura 48 apresenta as três configurações mais tradicionais de dispositivos para magnetização rotacional.

Figura 48 Magnetizadores rotacionais de tipo quadrado(a), hexagonal (b) e circular(c)⁵⁵

Segundo Tumanski⁵⁵ a configuração da Figura 48a, embora seja a mais utilizada, tem algumas desvantagens, tais como o tamanho máximo da amostra que pode ser acomodada no centro do dispositivo, e a magnetização não uniforme devida aos efeitos de borda. Esses problemas são aperfeiçoados mediante o uso de magnetizadores hexagonais⁵⁶ (Figura 48b) e circulares⁵⁷ (Figura 48c), mas o seu desenho e funcionamento são muito mais complexos. Uma alternativa para gerar campos magnéticos rotativos homogêneos, proposta pelo mesmo Tumanski⁵⁸, consiste em um dispositivo (Figura 49a) que possui um eletroímã que gira de maneira discreta. Este dispositivo é utilizado para medir o H (cujas componentes X e Y são registradas na superfície da amostra) para valores fixos de um B (induzido pela bobina enrolada no núcleo). Desta maneira, é possível fazer medições para diferentes ângulos entre o campo aplicado e a DL em amostras de Ferro Silício de

Grão Orientado. Este tipo de dispositivo resulta útil para medições estáticas simples relacionadas com a anisotropia presente no material, de maneira semelhante às medições angulares de RMB clássico, porém não é capaz de avaliar a resposta a campos dinâmicos, como os gerados mediante os magnetizadores convencionais. Devido à complexidade de criar eletroímãs capazes de girar fisicamente, em uma tentativa de melhorar a homogeneidade do campo aplicado, eliminando as limitações do tamanho máximo da amostra, Tumanski⁵⁹ propôs um arranjo de eletroímãs estacionários (Figura 49b), no qual a magnetização é aplicada em ambas as superfícies da amostra.

Figura 49 Dispositivo para análise de textura e anisotropia (a) e a configuração alternativa para homogeneizar o campo aplicado ^{58; 59}

5.3 Medições B-H utilizando magnetização rotacional

Como foi observado por Gumaïdh⁶⁰ em seu estudo de aços de Ferro Silício de Grão não orientado, um material ferromagnético submetido à magnetização rotacional, experimenta processos de reorganização magnética complexos e as distribuições circulares perfeitas de B e H não acontecem de maneira simultânea, devido às características anisotrópicas e não lineares dos materiais. Usualmente, na literatura, a abordagem mais comum é a leitura de H em função de um B rotacional constante, cujos resultados são apresentados em um gráfico polar (Figura 50a). Esta abordagem é habitual, talvez devido ao fato das medições unidirecionais com campo alternante também serem feitas dessa maneira, registrando mudanças de H para valores fixos de B ⁶¹. Entretanto, em equipamentos rotativos, as condições de

magnetização simplificadas se aproximam mais às de um H constante circular ou até às de um H que está mudando no espaço e cuja magnitude muda em relação ao tempo, em uma trajetória aproximadamente elíptica. A primeira condição se assemelha mais com a magnetização utilizada no método RMBCR. A Figura 50b ilustra os resultados da leitura de um B originado por um H rotacional com magnitude e velocidade constantes.

Figura 50 Gráficos BH utilizando magnetização rotacional com B fixo (a) e com H fixo (b)⁶⁰

Por outro lado, nem sempre os resultados são tão previsíveis, já que o B originado por um H girante, que se aproxima de uma direção de fácil magnetização, talvez seja diferente ao originado quando o mesmo H continua girando e se afasta da mesma, devido às diferenças na reorganização dos domínios. Esta discrepância foi reportada por Moses⁶¹ em experimentos conduzidos utilizando aço Fe-Si de Grão orientado (3.2% de Si), conforme ilustrado na Figura 51. É possível observar a existência de diferenças na distribuição do B quando o H gira em sentido anti-horário e horário, sendo um resultado a versão espelhada do outro, reiterando a complexidade dos efeitos resultantes deste tipo de magnetização.

Figura 51 Diferenças na magnetização rotacional decorrentes do giro em sentido anti-horário(a) e horário(b)⁶¹

5.4 Desvio do vetor $\vec{B}$ em relação ao vetor $\vec{H}$

Nos resultados reportados nas seções anteriores, é possível observar as distribuições polares de BH resultantes da magnetização rotacional. Porém, não foi mencionada a relação existente entre os vetores que dão origem às mesmas. Quando $\vec{H}$ é aplicado, utilizando magnetização unidirecional em direções diferentes aos eixos de fácil e difícil magnetização, geralmente existe um desvio em relação a $\vec{B}$. Este desvio é consequência dos efeitos da anisotropia da amostra, podendo mudar em função da magnitude de $\vec{H}$, desta forma, a orientação de $\vec{B}$ pode girar tanto para a esquerda como para a direita da orientação de $\vec{H}$ ^{62; 63}, como se ilustra na Figura 52. No entanto, é possível que exista um ponto no qual a intensidade de $\vec{H}$ (em combinação com outros fatores, como por exemplo, a espessura da amostra, a frequência de magnetização, o nível de anisotropia da amostra, etc.), atinge as condições favoráveis para ser aproximadamente paralelo com $\vec{B}$.

Figura 52 Possíveis desvios entre $\vec{B}$ e $\vec{H}$ em relação à intensidade de magnetização

No caso da magnetização rotacional, o desvio entre $\vec{B}$ e $\vec{H}$ é um problema mais complexo. Para entender melhor o desvio, é necessário observar de que maneira os sinais utilizados na análise são registrados nos magnetizadores rotacionais. Uma versão mais detalhada da Figura 48a, é apresentada na Figura 53, baseada no dispositivo amplamente utilizado por Enokizono^{50; 52; 53; 64}, onde pode ser observado que as bobinas magnetizam a espessura inteira da amostra, entretanto, o registro de H é feito mediante a utilização de um par bobinas de indução planas (sensores H), dispostas de maneira ortogonal para captar os componentes do campo paralelo às proximidades da superfície. Por outro lado, as mudanças de B são registradas mediante bobinas de indução (sensores B) dispostas de maneira perpendicular à superfície, captando assim as emissões provenientes do material, contendo contribuições não somente da superfície como também de camadas mais profundas.

Figura 53 Magnetizador bi-dimensional utilizado por Enokizono⁶⁵.

A Figura 54a (baseada na interpretação de Pfützner⁶³), ilustra os vetores que aparecem na superfície da amostra durante um processo de magnetização rotacional em sentido horário, onde $\vec{H}'$ indica que o $\vec{H}$ é superficial, enquanto $\vec{B}$ indica um $\vec{B}$ médio dependente da profundidade de penetração de H . Também se ilustra a defasagem de 90° entre $\vec{B}$ e $d\vec{B}/dt$. A Figura 54b ilustra a interpretação do processo de magnetização rotacional segundo Enokizono⁶⁴, onde também são incluídos os erros devidos ao desalinhamento entre as bobinas planas do sensor de H (elas devem ser perfeitamente ortogonais) e ao posicionamento dos sensores de B (eles devem ser perfeitamente perpendiculares à superfície da amostra). Nestes

experimentos de magnetização rotacional, nos quais ambos os autores reportaram o uso de aço Fe-Si de grão não orientado, independentemente do sentido de giro de $\vec{H}'$, este sempre antecede o $\vec{B}$. O ângulo de separação entre os vectores $\theta_{\vec{B}\vec{H}'}$, é denominado *ângulo de atraso* e nestas condições é considerado positivo.

Figura 54 Vetores envolvidos na magnetização rotacional segundo Pfützner (a) e Enokizono(b) ^{63; 64}

Na magnetização rotacional, o atraso entre $\vec{H}'$ e $\vec{B}$ tem contribuições interdependentes tanto da anisotropia, quanto da histerese e das correntes parasitas. A anisotropia pode gerar um atraso tanto positivo quanto negativo (quando $\vec{B}$ antecede $\vec{H}'$) em função da intensidade da magnetização, como no caso da magnetização unidimensional. Já o atraso devido à histerese e às correntes parasitas, somente geram atrasos positivos.

A histerese tenta dificultar a rotação de $\vec{B}$, gerando um atraso positivo em relação a $\vec{H}'$ durante o ciclo de magnetização rotacional. Para materiais isotrópicos, em velocidades de rotação quase estáticas, o atraso é constante, aproximando-se de zero quando o material está perto da saturação⁶⁶ apud ⁶³, já que nesse ponto a histerese é mínima devido a diminuição das paredes de domínio⁶³.

As correntes parasitas geram diferentes ângulos de atraso à distintas profundidades em função da frequência de magnetização. Quanto maior a frequência de magnetização maior o atraso, aproximando-se de zero para o caso da magnetização quase estática.

O ângulo de atraso observado na superfície não corresponde exclusivamente à $\vec{H}'$, já que nas camadas mais profundas, o atraso vai diminuindo na medida em

que $\vec{H}$ vai ficando mais tênue. Desta forma, o atraso observado na superfície, tem contribuições dos atrasos em diferentes profundidades. A análise dos efeitos das correntes parasitas é complexa, já que o material experimenta os mesmos efeitos observados na magnetização unidimensional, ou seja, mudanças na histerese em função da anisotropia e em função da frequência de excitação.

Contudo, em condições nas quais o campo magnetizante não é intenso o suficiente para gerar uma reorganização de domínios, envolvendo a geração/aniquilação dos mesmos, a atividade predominante é o deslocamento das paredes de 180° . Nestas condições, tem sido evidenciado um comportamento errático do atraso entre $\vec{B}$ e $\vec{H}'$ para magnetização com uma frequência de giro constante, com atrasos positivos e negativos que podem chegar a ser até de 90° ⁶⁷.

5.5 Repercussão dos atrasos BH nas medições de anisotropia obtidas mediante o método RMBCR – observações experimentais

Como foi descrito no capítulo anterior, o método RMBCR possui dois componentes complexos, o RMB e a magnetização rotacional. Dado que esta combinação é inédita, no começo do desenvolvimento do método, os sinais RMBCR eram avaliados em virtude da sua qualidade aparente, baseado na experiência prévia com sinais de RMB clássico. Estes últimos, muitas vezes sem requerer uma análise detalhada, são rapidamente classificados como bons ou ruins através de uma simples inspeção visual, tanto da sua forma no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Desta maneira, podem ser rapidamente identificados problemas tais como a falta ou excesso de magnetização, ruído causado por interferências eletromagnéticas ou por um acoplamento inadequado entre o sensor e a amostra, etc.

As combinações de frequência e intensidade de magnetização que resultavam em sinais RMBCR de boa qualidade foram descobertas empiricamente. A faixa de frequência de magnetização ótima vai do $5Hz$ aos $20Hz$, sendo facilmente controlável mediante a alteração da velocidade de rotação dos ímãs. Já a intensidade do campo podia ser regulada de duas maneiras, alterando as características dos ímãs ou de uma maneira mais simples, regulando o seu espaçamento (κ) relativo à amostra. A Figura 55 apresenta a evolução do sinal

RMBCR em relação à κ , registrada em experimentos efetuados na amostra 1 utilizada no capítulo anterior. Para condições nas quais os ímãs ficavam em uma altura apenas suficiente para evitar o contato com a superfície (campo magnético alto), o sinal parecia ser atenuado pela intensa magnetização, dificultando a detecção de alguma atividade RMB. Na medida em que κ aumentava, a qualidade do sinal melhorava. Ao chegar em $\kappa = 1.8\text{ cm}$, a qualidade do RMBCR era visivelmente superior. Embora a amplitude do sinal RMBCR crescesse levemente depois deste ponto, foi observado que seu contorno ia perdendo definição. Na medida em que κ continuava a aumentar, o RMBCR simplesmente ia se desvanecendo e adotando formas irregulares, desta vez provavelmente devido a uma magnetização muito fraca.

Depois de encontrar as condições que resultavam em um sinal RMBCR de boa qualidade, o sentido da magnetização era alternado de horário para anti-horário, não entanto sem provocar mudanças visualmente aparentes. Após um processamento *off-line*, os resultados constatavam que as medições nos dois sentidos eram praticamente idênticas. Posteriormente foi desenvolvida a metodologia RMBCR.

Eventualmente, o software de processamento evoluiu para funcionar online, permitindo uma visualização em tempo real mudanças na anisotropia magnética produzidas, por exemplo, pela tensão mecânica. Entretanto, no procedimento de calibração para encontrar a altura ótima em amostras com espessuras e composições diferentes, foi notado que o mapa polar de anisotropia não só mudava de forma, como também apresentava uma mudança considerável na sua inclinação em dependência de κ .

Foi ficando em evidencia que a defasagem de 90° entre a orientação da magnetização e o RMBCR máximo (Figura 38), está explicada pelo atraso entre $\vec{B}$ e $\vec{H}'$. A bobina leitora do sistema RMBCR é sensível ao $d\vec{B}/dt$, e o sua voltagem induzida máxima indica a presença de um eixo fácil. A Figura 56a ilustra o mapa de anisotropia obtido utilizando um $d\vec{B}/dt$ que gira aproximadamente a 13 Hz em sentido anti-horário com $\kappa = 1.79\text{ cm}$. Este vetor é paralelo ao eixo fácil real ($\phi = 0^\circ$) somente quando o $\vec{B}$ é paralelo a $\vec{H}'$, ou seja, quando $\theta_{\vec{B}\vec{H}'} \rightarrow 0^\circ$. A Figura 56b ilustra o resultado obtido com $\kappa = 1.25\text{ cm}$, onde $\theta_{\vec{B}\vec{H}'} > 0^\circ$, resultando em $\phi = -12.5^\circ$. De maneira oposta, a Figura 56c ilustra o caso no qual $\theta_{\vec{B}\vec{H}'} < 0^\circ$, o que resulta em $\phi = 8.3^\circ$.

Figura 55 Sinal RMBCR obtido utilizando diferentes valores de κ para uma frequência de giro de aproximadamente 13Hz.

Figura 56 Mapas de anisotropia obtidos utilizando $\kappa=1.72\text{cm}$ (a), $\kappa=1.25\text{cm}$ (b) e $\kappa=2.1\text{cm}$ (c)

Dado que para uma excitação rotacional com uma frequência fixa, a geometria do mapa de anisotropia magnética muda em função de κ , são definidos os seguintes “*parâmetros de forma*”, os quais dão indícios de tendências “alongadas” ou “arredondadas”:

- A *Proporção de Anisotropia* RMB de rotação: Definida como a proporção entre a *Energia Anisotrópica* RMB de rotação e a *Energia Isotrópica* RMB de rotação, para um instante de tempo determinado, descreve o ponto mais anisotrópico.
- A *Proporção de Isotropia* RMB de rotação: Definida como o recíproco da *Proporção de Anisotropia* RMB de rotação, para um instante de tempo determinado, descreve o ponto mais isotrópico.

Adicionalmente, o tamanho da distribuição de anisotropia magnética (com um único eixo fácil) pode ser refletido mediante o uso dos parâmetros ilustrados na Figura 57:

- O comprimento do eixo fácil (C_{EF}): Definido como a distância entre $RMBCR(\phi)$ e $RMBCR(\phi + 180^\circ)$.
- O comprimento do eixo difícil (C_{ED}): Definido como a distância entre $RMBCR(\phi + 90^\circ)$ e $RMBCR(\phi + 270^\circ)$.

Figura 57 Parâmetros baseados na forma do mapa de anisotropia magnética

A Figura 58 apresenta a evolução dos parâmetros C_{EF} e ϕ em função de κ . As medições foram efetuadas separando os ímãs da amostra, entre $\kappa = 1\text{cm}$ e $\kappa = 4\text{cm}$, a uma velocidade de 0.9 cm/min . O procedimento foi realizado magnetizando tanto em sentido horário como em sentido anti-horário. Em ambos os casos pode-se observar que o $\theta_{BH'}$ é positivo até $\kappa = 1.72\text{cm}$ (ponto ótimo). Uma vez que este ponto é ultrapassado, $\theta_{BH'}$ começa a ser cada vez mais negativo, enquanto o sinal RMBCR começa a perder qualidade, até chegar em $\kappa = 4\text{ cm}$. No

ponto ótimo, a densidade de fluxo magnético registrada na superfície é de aproximadamente 470 G, valor baixo quando comparado com o fluxo de saturação para o material da amostra 1 (13.700 G) ⁶⁸. Também na mesma figura é ilustrada a evolução do C_{EF} , onde é possível observar em detalhe o comportamento previsto na Figura 55. O parâmetro C_{EF} teve um valor inicial próximo de 2V, aumentou até 6.8V nas proximidades do ponto ótimo, posteriormente atingindo um valor máximo de 7.5V ($\kappa = 2.14\text{cm}$), até começar diminuir de novo em função da baixa intensidade de magnetização.

Figura 58 evolução de ϕ em função de κ magnetizando em sentido horário e anti-horário

A Figura 59a descreve o comportamento do parâmetro *Proporção de Anisotropia* RMB de rotação, utilizando magnetização tanto em sentido horário como em sentido anti-horário. Além do valor κ correspondente ao valor máximo da evolução não coincidir exatamente com o valor κ para o ponto ótimo, é possível observar a existência de certa assimetria, já que existe uma inclinação para a esquerda do ponto ótimo, indicando que as distribuições de anisotropia nesta região são mais “alongadas”. A Figura 59b ilustra a diferença entre as formas resultantes de dois mapas de anisotropia com parâmetros C_{EF} iguais, obtidos utilizando diferentes intensidades de magnetização. A figura obtida à esquerda do

ponto ótimo, além de ser mais alongada, apresenta um atraso menor. A Figura 59c ilustra de maneira esquemática a possível influência da histerese, a anisotropia e as correntes parasitas no atraso entre $\vec{B}$ e $\vec{H}'$ durante a magnetização rotacional.

Figura 59 Evolução da *Proporção de anisotropia*_{RMB} de rotação magnetizando em sentido horário e anti-horário(a). Diferença entre mapas de anisotropia com parâmetros C_{EF} iguais e κ diferentes (b). Possível influência dos fatores que afetam o atraso (c).

Não existe uma fórmula exata para chegar à condição $\theta_{BH'} \rightarrow 0^\circ$, porém, pode-se dizer que o ponto ótimo não é mais do que um ponto de equilíbrio entre os atrasos gerados pela interdependência da anisotropia, a histerese e as correntes parasitas. Quando a magnetização é alta, existe uma influência predominante das correntes parasitas, gerando um atraso positivo que diminui gradativamente na medida na qual o campo magnético perde profundidade de penetração no material. Para combater esse efeito, é possível aumentar o valor de κ , no entanto, em algum momento a intensidade de magnetização não será suficiente, e provavelmente a maior parte das linhas de campo entre os ímãs, irão se fechar no ar, fazendo com que o atraso total seja próximo de zero, mas obtendo um RMBCR de qualidade ruim. Por outro lado, em condições de magnetização intensa, a anisotropia e a histerese não têm uma influência tão significativa no atraso. No entanto, na medida em que κ aumenta, a intensidade da magnetização diminui e o fluxo magnético no material localizado na parte inferior da bobina leitora, vai perdendo homogeneidade,

contribuindo com o atraso por histerese. Aparentemente, quando a magnetização continua a diminuir em relação ao ponto ótimo, acontece um desequilíbrio que faz com que os efeitos da anisotropia sejam predominantes, gerando atrasos negativos. Nesse caso, a intensidade de magnetização não é forte o suficiente para gerar RMBCR em direções diferentes a ϕ , predominando o deslocamento das paredes domínio de 180° cuja orientação é praticamente paralela ao eixo fácil.

5.6 Conclusões

Experimentos de magnetização rotacional baseados em arranjos de eletroímãs são úteis para entender a intrincada relação entre H e B , mesmo com algumas desvantagens, tais como a sua complexidade e em alguns casos a não homogeneidade de magnetização, além das diferenças causadas pelo sentido de magnetização, (horário, anti-horário).

A natureza dos sinais H e B medidos durante a magnetização rotacional dependem da geometria e disposição dos sensores utilizados. Usualmente, os sensores de H estão compostos por pares ortogonais de bobinas de indução planas, que registram H na superfície, enquanto os sensores B , também de indução, registram contribuições tanto da superfície quanto de camadas mais profundas. Para fazer ênfase na natureza dos sinais, é adotada a notação de Pfützner, onde H' corresponde ao H na superfície e $\bar{B}$ corresponde a um B médio em função da profundidade de pele.

Em condições de magnetização rotacional, $\vec{H}'$ sempre antecede $\vec{\bar{B}}$ e o ângulo de atraso entre os dois $\theta_{\bar{B}H'}$ é definido como positivo. Entretanto, $\vec{\bar{B}}$ sempre é ortogonal a $d\vec{\bar{B}}/dt$. Em condições de magnetização muito baixa é observado um $\theta_{\bar{B}H'}$ negativo. O atraso $\theta_{\bar{B}H'}$ é interdependente das correntes parasitas, a histerese e a anisotropia. Para frequências fixas, a influência das correntes parasitas é predominante em condições de magnetização alta, mas diminui quando a intensidade do campo decresce. De maneira oposta, os efeitos da anisotropia e a histerese sobre $\theta_{\bar{B}H'}$ são mais evidentes em condições de baixa magnetização, e diminuem na medida em que a magnetização aumenta. As correntes parasitas e a histerese somente geram atrasos positivos, enquanto a anisotropia pode gerar atrasos tanto positivos como negativos.

Os sinais de RMBCR são afetados pelo $\theta_{\bar{B}H'}$. A sonda RMBCR permite mudar tanto a frequência de excitação, quanto a intensidade da mesma. Foi determinado experimentalmente que as condições de funcionamento são melhores para uma faixa de $5\text{Hz} - 20\text{Hz}$, podendo mudar facilmente a frequência regulando a velocidade de giro do dispositivo rotativo. A intensidade de magnetização pode mudar de duas maneiras, alterando os ímãs permanentes ou alterando o valor κ . A segunda abordagem é mais prática. Durante o processo para determinar o valor κ que otimiza a qualidade do sinal RMBCR, foi constatado que não somente a geometria da distribuição de anisotropia magnética muda, como também a sua inclinação.

Para encontrar o ponto de funcionamento ótimo do sistema RMBCR, são definidos três parâmetros: Comprimento do eixo fácil (C_{EF}), *Proporção de Anisotropia* RMB de rotação e *Proporção de Isotropia* RMB de rotação. A evolução dos dois primeiros é monitorada em alta resolução espacial, chegando a condições de equilíbrio (ponto ótimo), onde o atraso magnetizando tanto em sentido horário como em sentido anti-horário é aproximadamente igual a 0° , indicando a orientação de ϕ . No ponto de equilíbrio, a forma do mapa de anisotropia se aproxima da forma mais alongada registrada durante o monitoramento do processo. A escolha das condições inadequadas pode fazer com que o mapa registrado não seja uma representação confiável da distribuição da anisotropia magnética presente na amostra.

6 Uso do método RMBCR para monitoramento de tensão uniaxial.

6.1 Introdução

O capítulo 4 introduziu o método RMBCR, assim como uma série de novos parâmetros úteis na caracterização da anisotropia magnética em superfícies ferromagnéticas, na ausência de um carregamento externo. No entanto, como foi notado na seção 3.4 o RMB também pode ser utilizado para monitorar as mudanças da anisotropia magnética, induzidas devido à aplicação de tensão mecânica. Neste capítulo é aproveitada a capacidade do método RMBCR de detectar distribuições de anisotropia magnética em tempo real, para monitorar processos de carregamento mecânico contínuo. Os experimentos foram realizados em amostras de aço estrutural utilizando um carregamento uniaxial contínuo. Embora a tensão mecânica seja aplicada de maneira unidimensional, o efeito observado de maneira indireta através de medições de anisotropia magnética e dos parâmetros RMBCR, é bidimensional. Os resultados sugerem que a evolução dos parâmetros de RMBCR, pode ser utilizada para obter curvas de calibração entre o RMB e a tensão uniaxial aplicada.

6.2 Materiais e métodos

Para os experimentos apresentados neste capítulo, foram utilizadas duas amostras de aço AISI 1070, laminado a quente e recozido, uma delas carregada em sentido paralelo à direção de laminação (DL) e a outra transversal à direção de laminação (DT). As características do material são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 Características do material utilizado para ensaios de tensão uniaxial

Material	Espessura (mm)	Porcentagem em massa do elemento							
		C	Si	S	Mn	P	Cr	Ni	Al
AISI 1070	3,0	0,67	0,22	0,003	0,69	0,018	---	---	0,043

Os níveis de tensão foram aplicados desde a compressão até a tração, sempre sendo mantidos abaixo do limite de escoamento do material (500 MPa). Para cada amostra, a sonda de RMBCR foi posicionada no centro da superfície, enquanto a tensão mecânica foi aplicada utilizando uma taxa de carregamento de aproximadamente $\frac{1\text{MPa}}{s}$. Durante este processo, a taxa média de gravação de dados foi de 5 mapas de anisotropia magnética por segundo, provendo registros em alta resolução temporal da evolução dos parâmetros RMBCR. A mudança destes parâmetros em função da tensão mecânica (σ) pode ser analisada de cinco formas diferentes, mediante um registro simultâneo: do nível RMBCR em diferentes orientações selecionadas, das características do vetor eixo fácil, dos parâmetros de energia, dos parâmetros de proporcionalidade entre energias e de maneira gráfica utilizando o mapa de anisotropia magnética para cada estado de tensão.

6.3 Resultados e discussão

A primeira forma de análise, quando realizada utilizando o RMB clássico, usualmente requer de um procedimento trabalhoso, com altas probabilidades de induzir erros, devido ao constante reposicionamento da sonda, já que para cada patamar de carregamento é necessário reorientá-la a diferentes ângulos (usualmente 0° , 30° , 45° , 60° e 90° em relação à DL). Usando o método RMBCR, é possível monitorar todas as orientações de maneira simultânea com uma excelente resolução angular.

A Figura 60 apresenta os resultados dos níveis de voltagem RMBCR máxima, para diferentes ângulos durante o processo de carregamento da amostra 1. O processo de carregamento começa com um carregamento de compressão ($\sigma = -65\text{MPa}$). Neste ponto, o maior valor corresponde a RMBCR (90°), e o menor a RMBCR (0°), indicando que em condições de compressão paralela à DL, a distribuição de anisotropia provavelmente encontra-se distribuída ao longo da direção transversal à laminação (DT). Na medida em que o processo de carregamento avança, o RMBCR máximo nas direções monitoradas converge nas proximidades de $\sigma = -65\text{MPa}$. Após avançar até $\sigma = 0\text{MPa}$, o maior valor corresponde a RMBCR (0°), indicando que em condições de tensão nula, a anisotropia está orientada na DL. Com o aumento da tensão, RMBCR (0°) continua

a crescer, enquanto RMBCR (90°) continua a diminuir, dando indícios de que a anisotropia magnética vai ficando mais definida com o acréscimo da tração. O comportamento indica uma mudança de orientação da distribuição de anisotropia magnética ao redor do ponto monitorado, devido à tensão mecânica aplicada, favorecendo o RMBCR na DL.

Figura 60 Evolução do valor RMBCR a diferentes orientações em relação ao sentido de aplicação da tensão durante o carregamento da amostra 1

Uma visão alternativa do processo pode ser obtida ao observar a evolução simultânea dos parâmetros C_{EF} e ϕ . Para ambas as amostras, as mudanças de ϕ são registradas utilizando o sentido de aplicação da tensão como referência, marcado na amostra como 0°. Na Figura 61 pode-se observar o processo que começa em $(\sigma, \phi, C_{EF}) = (-156.63 \text{ MPa}, 86.78^\circ, 7.62 \text{ V})$, apresentando uma anisotropia magnética aparentemente orientada na DT. Posteriormente, com o acréscimo da tensão, o processo chega ao momento mais isotrópico, indicado pelo mínimo absoluto do perfil do C_{EF} que corresponde ao ponto $(\sigma, \phi, C_{EF}) = (62.81 \text{ MPa}, 33^\circ, 6.67 \text{ V})$. Em condições de carregamento nulo, pode ser observado que no ponto $(\sigma, C_{EF}, \phi) = (0 \text{ MPa}, 7.61 \text{ V}, 2.76^\circ)$, a anisotropia magnética está orientada em um sentido aproximadamente coincidente com a DL. Na medida em que o carregamento continua a aumentar, ϕ continua a se aproximar da DL e C_{EF} atinge o valor máximo absoluto de 9.13 V.

Figura 61 Evolução das características do vetor eixo fácil em relação ao carregamento na amostra 1

A Figura 62 ilustra o processo desde a perspectiva dos parâmetros de energia derivados do sinal RMBCR. O carregamento começa em um estado no qual a *Energia Isotrópica*_{RMB de rotação} é predominante, e o valor da *Energia Total*_{RMB de rotação} corresponde ao valor mínimo registrado durante todo o processo. Na medida em que a tensão chega a $\sigma = 62.81 \text{ MPa}$, é alcançado o ponto no qual a influência da *Energia Isotrópica*_{RMB de rotação} é mais marcada, enquanto a tendência crescente da *Energia Total*_{RMB de rotação}, é mantida. Conforme o processo avança, o aumento da tração faz com que a contribuição da *Energia Anisotrópica*_{RMB de rotação} se destaque cada vez mais, enquanto a sua contraparte vai diminuindo. Ao chegar em $\sigma = 43.72 \text{ MPa}$ as energias se equiparam. O comportamento linear crescente da *Energia Total*_{RMB de rotação} se mantém ao longo do processo, sendo possível utilizá-lo para estabelecer uma correlação com a tensão mecânica, que pode ser utilizada para fins de calibração.

A tendência dos parâmetros RMBCR ilustradas tanto na Figura 61 quanto na Figura 62, são coerentes com observações experimentais da evolução dos parâmetros de anisotropia magnética, α , β , ϕ e de energia RMB reportadas por outros autores⁴³ (ver Figura 31b), obtidas mediante ensaios discretos de tensão uniaxial utilizando RMB clássico.

Figura 62 Evolução dos parâmetros de energia em relação ao carregamento na amostra 1

Adicionalmente, mediante a análise do comportamento dos parâmetros percentuais RMBCR, a evolução das componentes da anisotropia magnética pode ser quantificada. A Figura 63 ilustra o processo, que começa com uma proporção de 61% isotrópica / 39% anisotrópica, e termina quase que com a tendência contrária, 36.4% isotrópica / 63.6% anisotrópica. O Valor pico do parâmetro *Proporção de isotropia magnética* indica o momento no qual a distribuição de anisotropia magnética possui uma forma mais “arredondada”.

Figura 63 Evolução dos parâmetros percentuais em relação ao carregamento na amostra 1

De maneira semelhante, os resultados para a amostra 2 são apresentados na mesma sequencia. A Figura 64 apresenta a evolução do RMBCR para os ângulos 0° , 30° , 45° , 60° e 90° de maneira simultânea. No começo do processo, o valor máximo corresponde a RMBCR (90°), e o mínimo a RMBCR (0°), indicando que a distribuição de anisotropia encontra-se orientada ao longo da DL. O processo continua até chegar a $\sigma = 0MPa$, onde embora exista uma queda no valor RMBCR (90°), este continua sendo maior do que nas outras direções, indicando que em condições de carregamento nulo a anisotropia magnética está orientada paralela á DL. Os valores do RMBCR convergem nas proximidades de $\sigma = 94MPa$, ponto no qual provavelmente a anisotropia magnética da amostra é mínima. O comportamento indica a mudança na orientação da anisotropia magnética no ponto monitorado durante o processo. A anisotropia magnética apresenta uma tendência a ficar paralela ao sentido de aplicação da tensão mecânica.

Figura 64 Evolução do valor RMBCR a diferentes orientações em relação ao sentido de aplicação da tensão durante o carregamento da amostra 2

Na Figura 65 pode-se observar a evolução de maneira simultânea dos parâmetros C_{EF} e ϕ na amostra 2. O processo começa em $(\sigma, \phi, C_{EF}) = (-121.01MPa, 88.18^\circ, 8.58V)$, com uma anisotropia magnética aparentemente orientada na DL. Neste ponto, o valor de C_{EF} é o máximo absoluto. O processo avança até chegar ao ponto $(\sigma, C_{EF}, \phi) = (0MPa, 7.68V, 86.01^\circ)$. Nestas condições

de carregamento nulo, se observa que a anisotropia magnética está orientada em um sentido aproximadamente coincidente com a DL. Continuando o carregamento, o momento mais isotrópico acontece no ponto $C_{EF}(\sigma, \phi, C_{EF}) = (93.92MPa, 127.92^\circ, 6.58V)$. Na medida em que o carregamento continua a aumentar, ϕ continua a se aproximar da DL e C_{EF} atinge 7.19V.

Figura 65 Evolução das características do vetor eixo fácil em relação ao carregamento na amostra 2

A Figura 66 ilustra o processo desde a perspectiva dos parâmetros de energia derivados do sinal RMBCR. O carregamento começa em um estado no qual a *Energia Anisotrópica* *RMB de rotação* é predominante, registrando o valor mínimo absoluto da *Energia Total* *RMB de rotação*. Conforme o processo avança, as energias se equiparam no ponto $\sigma = -33.28MPa$. Na medida em que o processo avança, a tensão chega a um valor $\sigma = 93.92MPa$, momento no qual a influência da *Energia Isotrópica* *RMB de rotação* é mais marcada enquanto é notado que a *Energia Total* *RMB de rotação* possui uma tendência crescente. Conforme o processo avança, o aumento da tração faz com que a contribuição que da *Energia Isotrópica* *RMB de rotação* se destaque cada vez mais, enquanto a sua contraparte vai diminuindo. O comportamento linear crescente da *Energia Total* *RMB de rotação* se mantém ao longo do processo inteiro. Como no caso da amostra 1, é possível estabelecer uma correlação entre a

$Energia\ Total_{RMB\ de\ rotação}$ e a tensão mecânica, que pode ser utilizada para fins de calibração.

Figura 66 Evolução dos parâmetros de energia em relação ao carregamento na amostra 2

A Figura 67 ilustra o comportamento em termos dos parâmetros percentuais ao longo do processo, que começa com uma proporção 33.5% isotrópica / 66.5% anisotrópica, e termina quase que com a tendência contrária, 68.1% isotrópica / 31.93% anisotrópica. O Valor pico do parâmetro Proporção de isotropia magnética indica o momento no qual a distribuição de anisotropia magnética possui uma forma mais “arredondada”.

Figura 67 Evolução dos parâmetros percentuais em relação ao carregamento na amostra 2

6.3.1 *Evolução da anisotropia magnética devida à tensão mecânica*

Nas seções anteriores, foram apresentadas algumas maneiras de identificar, por meio dos parâmetros RMBCR, os diferentes estados de anisotropia magnética de um material submetido a um processo de carregamento contínuo. No entanto, a inspeção visual dos mapas de anisotropia magnética resultantes, permite acompanhar (em tempo real) a natureza bidimensional do processo de carregamento. As medições de RMBCR são relativas ao estado de anisotropia magnética inicial das amostras, o qual pode ser consequência dos processos de fabricação.

Tanto no carregamento da amostra 1 quanto da amostra 2, ϕ se orienta gradativamente ao sentido de aplicação da tensão. No caso da amostra 1, o crescimento da anisotropia é beneficiado pela maior proporção de domínios de 180° orientados de maneira favorável à tensão. Os mapas de anisotropia magnética obtidos durante o processo de carregamento das amostras 1 e 2 são ilustrados na Figura 68 (Pág. 98) e Figura 69 (Pág.99) respectivamente.

Figura 68 Evolução da anisotropia magnética induzida pela tensão mecânica na amostra 1 (cortada no sentido longitudinal à DL)

Figura 69 Evolução da anisotropia magnética induzida pela tensão mecânica na amostra 2
(cortada no sentido transversal à DL)

6.4 Conclusões

Nos experimentos apresentados neste capítulo, foi utilizada a técnica RMBCR para monitorar mudanças de tensão mecânica uniaxial, utilizando medições de anisotropia magnética. Nas duas amostras estudadas foi observada uma tendência de aumento da *Energia Total* *RMB de rotação* em relação à tração, sendo possível obter curvas de calibração. O comportamento do parâmetro ϕ é coerente com o esperado em um ensaio feito usando a técnica RMB clássica.

Os parâmetros derivados dos mapas polares de anisotropia magnética, obtidos em tempo real usando o RMBCR, fornece uma informação mais detalhada da evolução do processo em comparação com a informação provida por uma sonda RMB clássica. Com esta última, somente seria possível realizar medições unidirecionais durante o processo de carregamento.

A eficácia da técnica RMBCR para medição de tensões mecânicas uniaxiais é comprovada, obtendo resultados de maneira prática e rápida, utilizando uma metodologia que poderia ser aplicada para monitorar condições de tensão mais complexas, por exemplo, tensões biaxiais.

7 Mapeamento da direção de campos de tensões em superfícies ferromagnéticas.

7.1 Introdução

O método RMBCR foi inicialmente aplicado para a detecção de estados de anisotropia magnética em superfícies ferromagnéticas em condições de tensão mecânica nula, com o objetivo de determinar características tais como a orientação do eixo de fácil magnetização. Dado que o método RMBCR possibilitou a visualização de resultados, em tempo real, a aplicação subsequente (capítulo 6) viabilizou a utilização das mudanças de anisotropia magnética (seção 3.4) na monitoração de estados de tensão uniaxial. Apesar disso, já que o RMB é um fenómeno associado a alterações superficiais, a avaliação de estados de tensão biaxial seria uma aplicação muito mais abrangente do RMBCR.

Neste capítulo, é investigada a capacidade do método RMBCR para detectar alterações na anisotropia magnética originadas por diferentes condições de tensão biaxial. Isto, por meio de medições realizadas na superfície de uma amostra na qual é aplicado um carregamento assimétrico de valor fixo. Os resultados do RMBCR foram comparados com medições de extensometria registradas nos mesmos pontos de medição. No entanto, o objetivo não é estabelecer uma calibração direta entre o RMBCR e a tensão biaxial, mas sim, obter a tendência do campo de tensões resultante, mesmo que de maneira qualitativa. Este campo de tensões, registrado de maneira experimental, foi comparado com uma simulação por elementos finitos.

7.2 Materiais e métodos

Neste experimento, foi utilizada uma amostra de aço UNS S43000, laminada a frio e recozida, em estado “como recebida” (Tabela 9). Foram realizadas medições de anisotropia magnética em pontos selecionados utilizando a técnica RMBCR com objetivo de registrar as mudanças decorrentes da aplicação do carregamento assimétrico, nas condições ilustradas na Figura 70. Em cada ponto de medição

(Tabela 10) foi instalado um extensômetro tipo roseta tripla (0° , 45° , 90°) para detectar a magnitude e direção das tensões principais.

Tabela 9 Composição química do material da amostra utilizada.

Material	Porcentagem em massa do elemento								Espessura (mm)	Dimensões (mm)
	C	Si	S	Mn	P	Cr	Ni	Al		
UNSS43000	0,05	0,33	---	0,19	---	16,1	0,18	---	1,0	240x238

Figura 70 Esquema da configuração experimental indicando os pontos de medição, o local de aplicação da carga e a direção de laminação

Tabela 10 Coordenadas dos pontos de medição

Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
X(mm)	30	30	30	120	120	120	210	210	210
Y(mm)	30	120	210	30	120	210	30	120	210

Tanto as medições de RMBCR quanto as de extensometria foram registradas sequencialmente em cada ponto para três estados diferentes de tensão:

Estado 1: Condições de tensão mecânica nula. Já que ambos tipos de medição são relativos, os resultados de este estado foram utilizados como referência.

Estado 2: Sob os efeitos do próprio peso da amostra, depois desta ter sido fixada no extremo JM.

Estado 3: Estado resultante depois de aplicar uma força $P_z = -9.50N$ ponto K.

Na seguinte seção, os subscritos numéricos utilizados nos parâmetros, fazem referência ao estado de tensão, por exemplo, ϕ_1 corresponde ao valor ϕ no estado 1. As diferenças de um mesmo parâmetro entre estados diferentes são expressadas, por exemplo, da forma ϕ_{13} , equivalente a $\phi_3 - \phi_1$.

7.3 Resultados e discussão

A Figura 71a ilustra a representação vetorial das medições de extensometria, registradas em cada ponto de medição no estado 1. Estas representações estão acompanhadas pelos valores da tensão principal maior (σ_1), a tensão principal menor (σ_2) e do ângulo principal (θ_p). Neste estado os extensômetros são zerados, porém, eles registram pequenas oscilações ao redor de zero. No entanto a leitura registrada não apresenta nenhum tipo de tendência.

Contrariamente, as medições de RMBCR neste estado apresentam uma tendência, ilustrada de maneira simplificada na Figura 71b, mediante o uso dos eixos de fácil e difícil magnetização (previamente definidos na Figura 57). Nesta representação, escolhida para facilitar a comparação com os resultados da extensometria, o comprimento dos eixos é proporcional à sua magnitude. Em todos os pontos é utilizada a mesma escala. O parâmetro utilizado para quantificar a anisotropia magnética é a *Relação $RMB_{\text{conteúdo de energia anisotrópica}}$* (abreviado para o estado 1 como *Relação RMB_{CEA_1}*). Este último parâmetro, junto com o valor do ângulo ϕ da distribuição de anisotropia magnética resultante, são apresentados em cada ponto. Observando os resultados das medições de RMBCR, é relevante notar que:

- Os pontos A, B, C, apresentam valores da *Relação RMB_{CEA_1}* mais de duas vezes maiores ao valor mínimo absoluto, registrado no ponto F. Além disso, o ponto C, apresenta um valor ϕ_1 com uma orientação muito próxima da DL.

- Os pontos D, E, F, apresentam os menores registros do parâmetro *Relação RMB_{CEA_1}* , em todos os casos, inferior a 23%.
- O ponto G (o mais próximo do local de aplicação da carga) apresenta a máxima *Relação RMB_{CEA_1}* (77.3%), indicando uma anomalia que poderia ser causada devido à presença de tensões residuais na região.

Figura 71 Medições utilizando extensometria (a) e os parâmetros RMBCR (b) no estado 1

Estas medições de RMBCR refletem algumas não homogeneidades, provavelmente devidas à constante manipulação da amostra (fixação e carregamento de maneira repetitiva), ao peso da sonda RMBCR (180g) e/ou aos efeitos decorrentes do processo de corte da amostra. Todos estes efeitos, que dependendo da intensidade podem repercutir no sentido do campo de tensões, são transparentes para as rosetas durante a calibração para obter o estado de referência.

Utilizando a mesma metodologia do estado 1, a Figura 72 esboça os resultados obtidos no estado 2. As rosetas confirmaram a existência de regiões tanto em tração (pontos A, B, C, E e F) quanto em compressão (pontos D, G, H e I). Em comparação com a Figura 71, é notável que a orientação de ϕ_2 nos pontos A, B, e C, muda significativamente em relação ao estado 1, seguindo uma tendência semelhante à registrada pelas rosetas. Sem embargo, nos demais pontos os resultados permanecem praticamente inalterados, sugerindo que nessas regiões, os níveis de tensão não são grandes o suficiente para causar alterações na anisotropia magnética inicial.

Figura 72 Medições utilizando extensometria (a) e os parâmetros RMBR (b) no estado 2

Os desvios de ϕ observados no estado 2, relativos ao estado 1 (ϕ_{12}), foram avaliados levando em consideração tanto o estado de anisotropia magnética presente na amostra no estado de referência (*Relação* RMB_{CEA_1}) quanto os níveis de

tensão resultantes no estado 2 (σ_{12}). O resultado desta avaliação é ilustrado na Figura 73 (Pág. 107), onde podem ser identificados três grupos de pontos, cada um apresentando uma tendência particular.

O grupo 1 (pontos A, B e C), além de possuir os maiores valores σ_{12} , exibe desvios ϕ_{12} mais marcados dado que as orientações iniciais ϕ_1 são desfavoráveis aos valores θ_{p_2} . Os seus valores da *Relação* RMB_{CEA_1} são considerados como médios quando comparados com o maior valor registrado para este parâmetro (ponto G).

O grupo 2 (pontos D, E e F), no entanto possui os menores valores da *Relação* RMB_{CEA_1} . Desta forma, os seus eixos fáceis se alinham mais facilmente ao sentido da tração. Este grupo apresenta desvios ϕ_{12} menores aos do grupo 1, sem embargo, isto pode ser consequência de um nível de tensão aplicada insuficiente para reorientar a anisotropia magnética. O valor ϕ_{12} observado para o ponto F é o menor do grupo, provavelmente porque a sua orientação ϕ_1 estava em uma direção favorável, muito próxima de θ_{p_2} . Os valores da *Relação* RMB_{CEA_1} do grupo 2 podem ser considerados baixos em relação ao ponto G.

O grupo 3 possui valores da *Relação* RMB_{CEA_1} na região alta (ponto G), média (ponto I) e baixa (ponto H). No entanto, estes pontos estão submetidos a níveis de tensão muito baixos, resultando em mudanças ϕ_{12} muito sutis, motivo pelo qual os seus eixos continuam praticamente iguais aos registrados no estado 1.

Figura 73 Desvio ϕ_{12} relativo a combinação de anisotropia magnética (estado 1) e a σ_1 (estado 2)

A Figura 74a, ilustra a tendência das tensões principais no estado 3, no qual as componentes em tração apontam na direção do ponto K. Esta tendência facilita a visualização da intensidade da tensão nas diferentes regiões. Nos pontos A, B e C, por exemplo, a tensão é mais intensa, enquanto no ponto I esta permanece praticamente inalterada em relação ao estado 2.

As medições de RMBCR apresentadas na Figura 74b, apresentam uma tendência muito semelhante com a das respectivas medições de extensometria. Com exceção do ponto I, os eixos fáceis também apontam em direção do ponto K e possuem valores ϕ_3 próximos dos valores θp_3 . Sem embargo, existem algumas diferenças, por exemplo, a intensidade de carga é melhor identificada utilizando o parâmetro *Relação RMB_{CEA1}* ao invés dos comprimentos dos eixos. Dessa maneira pode ser observado que, por exemplo, o ponto A sofre uma mudança significativa em relação ao estado 1, tanto na distribuição da anisotropia magnética quanto na orientação da mesma, enquanto no ponto I, uma mudança mínima em comparação com o estado 1 sugere que os efeitos da carga são menores nessa região.

Não obstante, as medições RMBCR apresentam algumas ambiguidades, por exemplo, $\sigma_{13}(D) < \sigma_{13}(F) < \sigma_{13}(E)$ enquanto que $Relação\ RMB_{CEA_3}(E) < Relação\ RMB_{CEA_3}(F) < Relação\ RMB_{CEA_3}(D)$. Isto pode ser devido ao fato da anisotropia magnética inicial não ser tão homogênea ao longo da amostra.

Figura 74 Medições utilizando extensometria (a) e os parâmetros RMBCR (b) no estado 3

A Figura 75 (Pág. 110) apresenta os desvios resultantes entre ϕ_3 e θp_3 , os quais podem ser influenciados tanto pela anisotropia magnética inicial quanto pelo estado de tensões atingido no estado 3. Por esse motivo, estes desvios são avaliados em cada ponto em função dos parâmetros $Relação\ RMB_{CEA_1}$ e σ_{13} .

O ponto I apresenta o maior desvio $\phi_3 - \theta p_3$ absoluto, provavelmente devido a ao fato de estar submetido ao menor σ_{13} . Além disso, a sua *Relação RMB*_{CEA1} (média) pode dificultar a reorientação da anisotropia magnética.

O ponto H, também está submetido a valores baixos de σ_1 , os quais provavelmente não conseguem alterar a orientação ϕ_3 de maneira significativa, contribuindo ao desvio $\phi_3 - \theta p_3$.

O ponto G, possui o maior valor da *Relação RMB*_{CEA1}. Este ponto apresenta um desvio $\phi_3 - \theta p_3$ baixo devido ao fato de θp_3 estar muito próximo de ϕ_1 .

Os pontos E e F apresentam os menores desvios $\phi_3 - \theta p_3$. De maneira semelhante ao estado 2, no estado 3 seus eixos fáceis se alinham muito bem ao sentido de aplicação da tensão. Isto devido a uma boa combinação de uma baixa *Relação RMB*_{CEA1} com níveis de tensão, altos o suficiente, para alterar a distribuição de anisotropia magnética.

No ponto D, mesmo a *Relação RMB*_{CEA1} sendo baixa, o desvio $\phi_3 - \theta p_3$ pode estar originado devido a níveis de tensão muito baixos.

Já nos pontos A, B e C, que registram os maiores níveis de σ_{13} , deveriam apresentar um alinhamento quase perfeito entre os eixos fáceis e os ângulos da tensão principal maior. Sem embargo, os desvios $\phi_3 - \theta p_3$ nestes pontos parecem estar influenciados pela anisotropia magnética inicial (*Relação RMB*_{CEA1}). Os resultados obtidos nestes 3 pontos podem ser melhor observados na Figura 76 (Pág. 110), onde a combinação de tensão mecânica alta com anisotropia magnética inicial baixa, resulta em uma diminuição do desvio $\phi_3 - \theta p_3$. Na medida em que a tensão diminui enquanto a anisotropia magnética aumenta, aparece um acréscimo no desvio. Desta maneira, tensões baixas em condições de anisotropia magnética inicial alta, produzem os maiores desvios. Contrariamente, tensões altas em condições de anisotropia magnética inicial baixa, produzem os menores desvios.

Figura 75 Desvio entre ϕ_3 e θp_3 em função da anisotropia magnética (estado 1) e a $\sigma 1$ (estado 3)

Figura 76 Detalhe do desvio entre ϕ_3 e θp_3 em função da anisotropia magnética (estado 1) e a $\sigma 1$ (estado 3) dos pontos A,B e C

Para estimar a distribuição teórica das tensões correspondente ao carregamento utilizado, foi realizada uma simulação por elementos finitos, utilizando um modelo de material perfeitamente homogêneo. Vale a pena ressaltar que, apesar da baixa

resolução espacial das medições experimentais, elas fornecem uma tendência bastante parecida à obtida mediante a simulação, ilustrada na Figura 77.

Figura 77 Simulação da direção das tensões principais decorrentes do carregamento assimétrico

Para realizar medições de RMB em peças submetidas a estados de tensão, seja externa ou residual, sempre é desejável ter uma correlação direta com o valor da tensão mecânica. No entanto, dependendo da situação, nem sempre é possível já que não existem registros prévios que possam ser utilizados como estados de referência. Nesta situação, poderia resultar mais útil procurar a existência de gradientes de RMBCR ou de regiões no material com estados anisotropia magnética dissimilares. Este tipo de análise permitiria identificar regiões problemáticas que posteriormente poderiam ser avaliadas por meio de outras técnicas capazes de quantificar o nível de tensão mecânica, as quais podem não ser tão práticas nem econômicas.

Uma correlação direta entre os valores das tensões principais fornecidos pelas rosetas e as medições RMBCR, pode não ser adequada neste contexto já que a

amostra, em estado de tensão externa nula, apresenta regiões não homogêneas, o que pode indicar a presença de tensões residuais e resultar em calibrações erráticas.

7.4 Conclusões

O método RMBCR foi utilizado para detectar gradientes de tensão de maneira discreta, em uma chapa de aço obtendo tendências de orientação bastante similares com a extensometria, em uma situação de tensão biaxial. Este tipo de aplicação é relevante, já que geralmente em aplicações de engenharia, os materiais podem estar em condições de carregamento biaxial, devido a processos tais como a soldagem, a aplicação de carregamentos assimétricos ou de degradação localizada, por exemplo, térmica ou química, contribuindo com a aparição destes gradientes de tensão.

De acordo com o resultado teórico obtido mediante uma simulação por elementos finitos, os resultados qualitativos das medições de anisotropia magnética usando RMBCR, podem ser uma boa estimativa da tendência da orientação das tensões principais. Foi possível identificar regiões com estados de anisotropia magnética anómalos, como foi o caso do ponto G no estado 1. No entanto, para estabelecer uma correlação direta entre parâmetros derivados do RMBCR e os valores de tensão fornecidos pelas rosetas, o primeiro passo necessário seria levar a cabo medições de tensão residual.

Explorando a capacidade do método RMBCR de fornecer informação em tempo real, a metodologia utilizada nesta prova de conceito, poderia ser aplicada de maneira contínua, isto é, deslocando a sonda RMBCR em relação a peça a ser mapeada. A informação da forma da distribuição da anisotropia magnética poderia ser utilizada como uma estimativa da orientação do campo de tensões, em alta resolução espacial, ao longo de superfícies ferromagnéticas, abrindo a possibilidade, até agora inédita, da utilização de técnicas baseadas no RMB para estes fins.

8 Uso do método RMBCR para monitoramento da tensão biaxial contínua

8.1 Introdução

Anteriormente, o método RMBCR foi utilizado para detectar alterações na distribuição de anisotropia magnética em superfícies de aço, aos quais as condições de tensão mecânica utilizadas foram: nula, uniaxial contínua e biaxial estática.

Neste capítulo, será avaliada a capacidade do método RMBCR de acompanhar em tempo real, um processo de carregamento contínuo, aplicado de maneira tal que um estado de tensões biaxiais seja originado na superfície de uma amostra. As alterações de anisotropia magnética induzidas pela tensão biaxial são avaliadas mediante o uso de alguns parâmetros RMBCR, cujo comportamento é comparado com os valores instantâneos das tensões principais, obtidos mediante o uso de extensometria clássica.

Esta prova de conceito poderia ser relevante no desenvolvimento de novas tecnologias, como por exemplo a “extensometria magnética”, mediante a qual seria possível medir estados de tensão mecânica sem necessidade de preparar a superfície mediante o uso de produtos químicos ou de retirar camadas de proteção, por exemplo, pinturas (como no caso da extensometria clássica). Seria uma maneira prática, rápida e barata de avaliar estados de tensão mecânica.

8.2 Materiais e métodos

Nos experimentos apresentados neste capítulo, foi utilizada a amostra de aço UNS S43000 descrita no capítulo anterior (Tabela 9), disposta nas condições ilustradas na Figura 78, onde após ser fixada no extremo JM, um carregamento P_z foi aplicado no ponto K (240mm, 238mm) começando em valores positivos e terminando em valores negativos. O processo de carregamento foi controlado utilizando como parâmetro de retroalimentação o valor σ_1 no ponto E (120mm, 120mm), o qual foi obtido por meio de um extensômetro de roseta tripla. Durante o

processo de carregamento, os valores de σ_1 foram levados desde -60MPa até 90MPa , utilizando uma taxa aproximada de 0.46MPa/s , a qual permitiu registrar aproximadamente 1600 mapas de anisotropia magnética. A mudança dos parâmetros RMBCR a estes mapas, foi monitorada em função da tensão mecânica aplicada. Da mesma maneira, também foram comparadas as representações vetoriais da distribuição de anisotropia magnética com a das tensões principais.

Figura 78 Condições de carregamento inicial e final utilizados para o monitoramento da tensão biaxial contínua.

8.3 Resultados e discussão

A evolução da forma da anisotropia magnética em relação a σ_1 é apresentada na Figura 79 por meio dos parâmetros C_{EF} , C_{ED} . O Parâmetro C_{EF} , apresentou uma tendência a crescer com o aumento da tensão, porém, de maneira não linear. No

perfil de C_{EF} podem ser identificadas três regiões, descritas na Tabela 11, nas quais a taxa de crescimento é linear em relação ao aumento da tensão.

Tabela 11 Regiões de crescimento linear de C_{EF}

Região Linear de C_{EF}	σ_1 inicial	σ_1 final	Taxa de crescimento
1	-40MPa	-10.5MPa	19mV/MPa
2	7MPa	56MPa	34mV/MPa
3	56MPa	87.5MPa	22mV/MPa

Fora destas regiões, as mudanças de C_{EF} relativas a σ_1 são muito pequenas. Sem embargo, isso não significa que nesses pontos, a anisotropia magnética seja invariável como um todo, já que durante o carregamento, cada combinação (C_{EF} , C_{ED}) é única, da mesma maneira que cada combinação (σ_1 , σ_2). O perfil de C_{ED} apresenta um valor pico que coincide com o momento no qual a amostra passa pelo ponto correspondente à condição de referência (carregamento externo nulo). Neste ponto, $(\sigma_1, \sigma_2, \theta_p) = (3.46MPa, -5.42MPa, 0.55^\circ)$, tanto os valores registrados pelo extensômetro são resultado do peso próprio da amostra em combinação com o peso da sonda.

Figura 79 Evolução dos parâmetros C_{EF} e C_{ED} em relação a σ_1

A Figura 80 apresenta a evolução dos parâmetros ϕ e θ_p em relação a σ_1 , deixando em evidência um comportamento bastante similar entre si. Ambos parâmetros apresentam uma região intermediária e duas regiões lineares.

Na região intermediária, definida entre $\sigma_1 = -20\text{MPa}$ e $\sigma_1 = 40\text{MPa}$, tanto o estado de tensões quanto a anisotropia magnética se reorientam gradativamente, embora, seguindo tendências diferentes. Existe uma leve defasagem entre os ângulos já que na calibração do estado de referência, o valor $\theta_p = 0^\circ$ tem um valor correspondente de $\phi = 21^\circ$. Além disso, o comportamento de θ_p deixa ver que o extensômetro é mais sensível à carregamentos baixos do que o RMBCR.

Nas regiões lineares, pode-se observar que o valor de ambos os parâmetros decresce, no entanto, com inclinações diferentes. Na região linear correspondente à tensões de tração ($\sigma_1 > 40\text{MPa}$) devido a um leve desvio entre ϕ e θ_p , havendo uma interseção em $\sigma_1 = 56\text{MPa}$. Este desvio também pode estar influenciado pela anisotropia magnética inicial do ponto de medição, sem embargo, é relativamente pequeno, sendo inferior a 2.5° .

Figura 80 Perfis de ϕ e θ_p em relação a σ_1

A Figura 81a, ilustra o processo desde a perspectiva dos parâmetros de energia derivados do sinal RMBCR. Tanto no começo quanto no final do processo, a *Energia Anisotrópica* RMB de rotação predomina. Contrariamente, na região

intermediária, a *Energia Isotrópica*_{RMB de rotação} é predominante, atingindo um valor máximo no ponto $(\sigma_1, \sigma_2) = (3.46\text{MPa}, -5.42\text{MPa})$.

De maneira semelhante ao caso uniaxial, a *Energia Total*_{RMB de rotação} aumenta durante o processo inteiro. Sem embargo, na região de tração este parâmetro apresenta uma inclinação aproximadamente 25% menor em comparação com a região de compressão. O comportamento dos componentes da *Energia Total*_{RMB de rotação} dá indícios de que, independente do tamanho, a forma da distribuição de anisotropia é mais “alongada” em condições de tração do que de compressão.

Figura 81 Evolução dos parâmetros de energia RMB de rotação em relação a σ_1

A evolução das proporções entre as componentes da *Energia Total*_{RMB de rotação} pode ser melhor visualizada na Figura 82, mediante o uso dos parâmetros percentuais derivados do sinal RMB de rotação. Mais uma vez, os picos indicam o momento no qual a amostra passa pelo ponto de carregamento externo nulo. O Valor pico do parâmetro *Proporção de isotropia magnética* indica o momento no qual a distribuição de anisotropia magnética é mais homogênea, o que resulta em uma forma mais “arredondada”.

Figura 82 Evolução dos parâmetros percentuais RMBCR em relação a σ_1

8.3.1 Evolução da anisotropia magnética devida à tensão mecânica

A evolução dos parâmetros RMBCR em função da tensão mecânica é útil para identificar as mudanças na anisotropia magnética durante o processo de carregamento. Sem embargo, mediante uma comparação visual entre as representações vetoriais tanto das medições RMBCR quanto das tensões principais, a semelhança entre os resultados obtidos por meio destes dois métodos fica mais aparente. Dos 1600 estados de tensão mecânica registrados durante o processo, foram escolhidos oito para efetuar a comparação, quatro para a região da tração e quatro para a região de compressão.

A Figura 83 (Pág. 120) apresenta os mapas correspondentes à compressão. No começo do processo, a orientação do eixo de fácil magnetização tem a tendência de ficar perpendicular ao sentido de σ_2 , ou seja, da maior tensão de compressão. Desta maneira, ϕ tem a tendência de ficar paralelo a θ_p , que é a orientação de σ_1 . Na medida em que a tensão vai ficando menos trativa, o valor dos parâmetros C_{EF} e C_{ED} começa a diminuir, como foi notado na Figura 79. Chegando na região intermediária a tendência de paralelismo desaparece, provavelmente como consequência da anisotropia magnética inicial e da pouca sensibilidade do eixo fácil nesta zona.

A Figura 84 (Pág. 121) ilustra a parte do processo correspondente à tração. Na medida em que σ_1 vai ficando mais positiva, a área da anisotropia vai crescendo e o

seu contorno vai se alongando no sentido de θp , como indicado na Figura 79 pelo crescimento de C_{EF} e a diminuição de C_{ED} .

Durante este processo de carregamento, o ponto E do material passou por vários estados de tensão com combinações (σ_1, σ_2) únicas. Para estas combinações, também houve uma única distribuição de anisotropia magnética associada. Ainda assim, não foram calculadas correlações aproximadas entre os parâmetros RMBCR e a tensão mecânica, já que elas somente serviriam para este processo de carregamento específico e não seriam generalizadas.

Se uma amostra de material pudesse ser utilizada para estabelecer o estado de referência de uma peça antes de ser colocada em serviço, seria possível aplicar múltiplas combinações de estados de tensão. Poderia se proceder a escolher um valor σ_2 fixo, realizar uma varredura contínua para diferentes valores de σ_1 , e ir repetindo o processo para diferentes acréscimos de σ_2 , sempre dentro do limite de escoamento do material. Desta forma, seria consolidada uma base de dados de anisotropia magnética, eventualmente podendo alimentar algoritmos de reconhecimento de padrões.

Estes algoritmos seriam utilizados para correlacionar a forma da anisotropia magnética com o seu estado de tensões único. Este procedimento somente abrangeria condições de serviço nas quais não existem alterações de tipo micro estrutural. No entanto, nada impede que o procedimento seja executado para várias condições micro estruturais, com o objetivo de observar a repercussão dos mesmos nos parâmetros RMBCR.

Uma boa caracterização da resposta da anisotropia magnética à tensão mecânica em conjunto com a praticidade e rapidez oferecidas pelo método RMBCR, constituiriam uma excelente aplicação industrial para a detecção tanto de mudanças de tensão aplicada quanto de regiões com tensões residuais.

Nessas condições, se os resultados do método RMBCR resultassem em um mapa de anisotropia magnética que não se enquadram na base de dados, talvez as medições pudessem corresponder a regiões de deformação plástica.

Figura 83 Comparação direta entre a representação polar das tensões principais e a sua distribuição de anisotropia magnética associada (Compressão)

Figura 84 Comparação direta entre a representação polar das tensões principais e a sua distribuição de anisotropia magnética associada (Tração)

8.4 Conclusões

No trabalho experimental apresentado neste capítulo, foi usada a técnica RMBCR para realizar medições de anisotropia magnética correspondentes a um estado de tensões biaxial, induzido por um carregamento assimétrico contínuo. Os parâmetros RMBCR dão indícios de que para cada estado de tensão biaxial existe uma única distribuição de anisotropia magnética.

Embora a tendência dos ângulos ϕ e θ_p seja similar, existe uma leve defasagem entre eles, já que na calibração do estado de referência, o valor $\theta_p = 0^\circ$ tem um valor correspondente de $\phi = 21^\circ$. Aparentemente, o método RMBCR não é tão sensível à reorientação do estado de tensões quanto o extensômetro de tipo roseta tripla.

Durante o processo, a *Energia Total* *RMB de rotação* cresce de maneira linear com o aumento de σ_1 , porém, apresenta uma leve descontinuidade nas proximidades do ponto de tensão externa nula. Este comportamento se deve a que a tendência dos aportes das energias isotrópica e anisotrópica durante a compressão é diferente à tendência exibida durante a tração.

A análise conjunta dos parâmetros de forma, de energia e os percentuais, permite identificar a tendência da evolução da anisotropia magnética durante o processo.

A semelhança entre os mapas de anisotropia magnética e os estados de tensão mecânica é evidente mediante a comparação qualitativa das suas respectivas representações vectoriais, disponíveis para visualização em tempo real.

Utilizando o material base antes de ser colocado em serviço, poderia ser mapeada a resposta da anisotropia para diversas combinações de σ_1 e σ_2 dentro da região elástica, consolidando uma base de dados. Esta base de dados, posteriormente poderia ser utilizada para detectar estados de tensão em peças em serviço. Qualquer forma registrada que não se enquadre nos padrões da base de dados, poderia indicar alterações tais como a deformação plástica. Esta abordagem constituiria uma aplicação industrial muito versátil.

9 Medições dinâmicas utilizando o RMBCR – aplicação prática em juntas de solda.

9.1 Introdução

Nos capítulos anteriores foi demonstrado que o RMBCR pode ser utilizado para o monitoramento localizado de tensões mecânicas, de maneira indireta através da análise das mudanças decorrentes na anisotropia magnética, podendo desvendar a existência de gradientes de tensão sob certas condições de carregamento externo. Estes gradientes também podem ser detectados na ausência de um carregamento externo, e podem ser o resultado de estados de tensão residual, como no caso peças soldadas.

Nas operações de soldagem, as peças são unidas utilizando um enchimento de metal de solda (MS), depositado em uma junta em temperaturas superiores ao ponto de fusão. Posteriormente, as peças são resfriadas rapidamente em condições que podem depender de fatores tais como a geometria do bisel, espessura, aporte de calor utilizado na junta, entre outros. Durante este ciclo térmico, o metal base (MB) experimenta diferentes taxas de expansão e contração, as quais podem originar a aparição de tensões residuais decorrentes de grandes distorções, deformações plásticas, alívio de tensões pré-existentes, transformações de fase, etc. A fronteira entre o MB e o MS é conhecida como linha de fusão (LF) ou zona de ligação (ZL). A Figura 84Figura 85 (Pág.124) ilustra o volume de material compreendido entre a LF e uma região de MB inalterada. Este volume é melhor conhecido como a zona termicamente afetada (ZTA).

O RMB tem sido utilizado para caracterizar juntas soldadas ^{69; 70; 71; 72}, apresentando uma boa correlação entre a tensão residual e a amplitude de parâmetros escalares derivados do RMB. O consenso geral é que, além de ser sensível a uma grande variedade de características micro estruturais, a amplitude destes parâmetros escalares aumenta com a tração e a diminui com a compressão.

No entanto, medições angulares de RMB efetuadas em ensaios de tensão mecânica uniaxial (seção 3.4), mostraram que este comportamento pode ser prejudicado pela orientação da excitação magnética, caso esta não seja próxima da

direção da aplicação da tensão. Desta maneira, um mapeamento realizado mediante o deslocamento de uma sonda de RMB clássico sobre uma superfície soldada, poderia levar a análises equivocadas, caso as maiores componentes da tensão residual não coincidam com a direção de magnetização. Para evitar esse tipo de erros, a melhor abordagem seria o uso de medições angulares de RMB para realizar mapeamentos de anisotropia magnética em juntas de solda.

Figura 85 Zona termicamente afetada durante o processo da solda⁷³

Sem embargo, a complexidade das medições angulares de RMB tradicional faz com que seu uso seja inviável para efetuar este tipo de mapeamentos em alta velocidade. Contrariamente, o método RMBCR tem condições de medir a anisotropia magnética de maneira rápida o suficiente, para possibilitar um deslocamento relativo constante entre a sonda e a amostra, sendo possível realizar

mapeamentos ao longo da seção transversal da solda, com o objetivo de caracterizar a ZTA.

Neste capítulo, é apresentada uma caracterização das mudanças de anisotropia magnética na seção transversal de juntas de solda, utilizadas para unir tubos de aço inoxidável duplex (AID). Estes aços, devido a sua alta resistência, tanto à oxidação quanto à corrosão, são amplamente utilizados nas indústrias petrolífera, química e de geração de energia. As suas boas propriedades mecânicas em geral são devidas à combinação de fases micro estruturais ferrita (δ) (30% a 70%) e austenita (γ)⁷⁴. No entanto, estas fases exibem diferenças no coeficiente de expansão térmica, as quais contribuem com a aparição de tensões residuais⁷⁵, o que pode ser um problema em operações de soldagem.

Os corpos de prova utilizados nos experimentos apresentados neste capítulo, assim como os resultados dos ensaios metalográficos e de dureza efetuados nos mesmos, foram gentilmente cedidos pelo Professor Juan Manuel Pardal, o Professor Sérgio Souto Maior Tavares e o doutorando Guttemberg C. de Souza, todos pesquisadores da Universidade Federal Fluminense (UFF, Niterói - RJ). Estes resultados pertencem a estudos de caracterização de mudanças mecânicas e micro estruturais decorrentes de processos de solda em tubulações de AID *ASTM A928UNS S31803 Cl 1*^{76; 77; 78}.

9.2 Materiais e métodos

Os experimentos foram efetuados, em amostras extraídas de seções de solda utilizadas para formar tubulações de AID, da forma ilustrada na Figura 86. Nas bordas entre dois tubos adjacentes é usinado um bisel de maneira tal que na junta resultante possa ser depositada a solda. Os corpos de prova, são provenientes de dois tipos de tubulações de AID, utilizadas para o transporte de hidrocarbonetos, cujas propriedades são detalhadas na Tabela 12.

Figura 86 Junta utilizada para depositar solda entre dois componentes de uma tubulação de AID .

Tabela 12 Características dos AID utilizados nas juntas de solda

Tubulação	Diâmetro externo (cm)	Espessura de parede (cm)	Dureza (HV)	Composição química (% em peso). (Fe) balanço								
				Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	P	S
1	45.72	3.45	280	22.81	5.39	2.84	1.83	0.3	0.16	0.017	0.03	0.007
2	27.31	2.14	286	22.88	5.33	2.83	1.82	0.32	0.16	0.015	0.029	0.04

O bisel utilizado nos extremos de cada tipo de tubo, foi usinado segundo as especificações da norma ASME B31.3 2010 para tubos com espessuras de parede superiores e inferiores a 22mm respectivamente. As juntas, consideradas como “de parede espessa”, foram identificadas como JPE1 e JPE2. Posteriormente a solda de liga de aço inoxidável duplex (AID), foi depositada em várias passadas, utilizando o processo de soldagem GTAW na raiz (R) da junta JPE1, GMAW na raiz (R) da junta JPE2 e SAW, para o enchimento (E) e acabamento (A) de ambas as juntas. Após depositada a solda, os corpos de prova foram extraídos mediante o uso de uma serra mecânica. Posteriormente, as superfícies transversais à solda foram fresadas para facilitar a caracterização micro estrutural. A Figura 87 apresenta as dimensões das amostras, assim como também a sequência dos passes de solda e as trajetórias utilizadas para efetuar as medições de microdureza e de RMBCR.

Figura 87 Sequencia de passes de solda em cada amostra. Podem ser detalhadas as trajetórias utilizadas para medir a micro dureza e para efetuar os mapeamentos RMBCR

Para efetuar as medições de anisotropia magnética, as amostras foram fixadas a uma mesa XYZ. Depois, a sonda RMBCR foi deslocada ao longo da trajetória de medição sobre a superfície transversal à junta de solda, usando uma velocidade constante de $\frac{1mm}{s}$. Este valor é comparável com o da velocidade utilizada por outros autores em mapeamentos feitos por meio de RMB clássico⁶⁹. Porém, em experimentos preliminares, foi constatado que não existem perdas perceptíveis de qualidade dos sinais utilizando velocidades de mapeamento de até $\frac{3mm}{s}$.

Já que as medições foram feitas nas amostras “como recebidas”, sem ter como avaliar o MB de um local distante da junta, não é possível ter um nível de referência, para estabelecer uma comparação quantitativa entre a anisotropia magnética inicial e as possíveis alterações da mesma na ZTA. Do mesmo modo, sem saber a orientação do eixo de fácil no MB, o valor ϕ de referência (0°), foi escolhido paralelo ao sentido axial dos tubos. Os mapeamentos começam e terminam em locais afastados da junta de solda, o suficientemente como para evitar a influência da ZTA.

A análise do RMBCR foi feita monitorando o parâmetro C_{EF} ao longo da trajetória de medição, com o objetivo de identificar a existência de algum padrão que se encaixasse com alguma das distribuições de tensões residuais, conhecidas para seções transversais de juntas de solda similares (Figura 88). Estas distribuições são decorrentes de processos de contração, têmpera, transformação ou de combinações das mesmas. Simultaneamente foi registrada a evolução do parâmetro ϕ para detectar possíveis mudanças na orientação da anisotropia magnética.

Figura 88 Distribuição de tensões residuais em seções transversais de juntas soldadas decorrentes de diferentes processos metalúrgicos ⁷³

9.3 Resultados e discussão

A Figura 89 e Figura 90, ilustram as diferenças de microestrutura entre o MB (a), o MS (b) e a ZL (c) para as amostras JPE1 e JPE2 respectivamente. Em ambos os casos, fica em evidencia a descontinuidade de fases na fronteira. Também pode ser observado que o tamanho das fases, quando comparado com o MB, aumenta nas proximidades da ZL.

Figura 89 Microestrutura do MB (a), MS(b) e da linha da ZL(c) na amostra JPE1 ⁷⁶

Figura 90 Microestrutura do MB (a), MS(b) e da linha da ZL(c) na amostra JPE2⁷⁷

A Figura 91 apresenta os resultados do mapeamento da anisotropia magnética na face transversal da mostra JPE1. Levando em consideração que o eixo de fácil magnetização tem a tendência de crescer paralelo ao sentido da tração, e de diminuir perpendicular ao sentido da compressão (Figura 68), a distribuição de anisotropia magnética pode dar indícios de lugares em alta tração ou compressão relativa. A Tabela 13 apresenta os pontos mais relevantes do perfil do C_{EF} obtido na amostra JPE1.

Figura 91 Perfis de ϕ e C_{EF} medidos na face transversal da mostra JPE1

Tabela 13 Pontos principais no perfil do C_{EF} (JPE1)

Distância (cm)	C_{EF} (V)	Local
4.38	3.33	Início
9.81	4.22	máx 1
14.64	0.44	Metade do MS
19.76	3.15	máx 2
24,72	2.09	Fim

O perfil de C_{EF} é relativamente simétrico em relação ao centro da junta, apresentando picos que aparecem em intervalos regulares, aproximadamente a $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ do comprimento total da amostra (Distância entre picos do $C_{EF} = 9.86 \text{ cm}$). Já que a condutividade térmica do material base, em teoria é homogênea, este comportamento pode refletir fluxos de calor simétricos no MB, como consequência do ciclo térmico durante a sequência dos passes de solda. Se ao valor mínimo C_{EF} , registrado no ponto final do perfil, lhe fosse assignado um nível de tensão residual (consequência da operação de solda) nula, o comportamento de C_{EF} indicaria que nos picos, predominam as tensões de tração enquanto que no intervalo entre $x = 12.5 \text{ cm}$ e $x = 18.07 \text{ cm}$, prevalecem as tensões compressivas.

Além de refletir elevados estados de tração relativa, os picos do C_{EF} podem ter contribuições notáveis decorrentes das mudanças do tamanho de grão, já que a amplitude do RMB é inversamente proporcional ao tamanho do mesmo^{28; 79}. Desta maneira, os picos de C_{EF} , podem indicar regiões de refino micro estrutural. Contrariamente, a diminuição do C_{EF} em direção do centro da junta de solda, pode refletir o crescimento gradativo do tamanho de grão no MB até chegar nas proximidades da ZL, como foi observado na metalografia (Figura 89). Ainda que o tamanho de grão seja menor no MS em relação ao MB, isto não resulta em um acréscimo do C_{EF} nesta região. Este fato pode ser explicado devido constituição heterogênea do MS, contendo uma proporção de defeitos maior do que o MB, os quais dificultam a movimentação de paredes, fazendo com que a reorientação dos domínios precise de um H maior ao fornecido pela sonda RMBCR.

Já o parâmetro ϕ , diminui de maneira não linear a partir do $C_{EF\text{máx } 1}$ em direção da junta de solda, até girar aproximadamente 90° em $x = 13.95 \text{ cm}$ ($\phi_{\text{máx } 1}$), dando inícios da presença de um gradiente micro estrutural. Contrariamente, do lado direito, a partir do $C_{EF\text{máx } 2}$ em direção da junta de solda, ϕ segue uma tendência

uniforme, próxima de 0° até $x = 16.03 \text{ cm}$ ($\phi_{\text{máx } 2}$), onde sofre uma descontinuidade abrupta. Aparentemente, deste lado da junta de solda, a ZTA é mais homogênea, enquanto do lado esquerdo o material pode ter experimentado, por exemplo, variações no aporte de calor, provocadas por velocidades irregulares de soldagem. Estas irregularidades também podem-se ver refletidas pela disparidade entre os picos do C_{EF} . Adicionalmente, a Figura 91 também ilustra os mapas de anisotropia magnética, tanto nos extremos da linha de mapeamento, quanto nos valores pico e no centro da junta de solda.

A Figura 92a apresenta o perfil de $\frac{d\phi}{dx}$ ao longo da junta de solda, no qual é possível observar que existem descontinuidades bruscas na proximidade do MS. Estas descontinuidades podem ser uma melhor estimativa do espaçamento entre as fronteiras da ZL, do que poderia ser o perfil de C_{EF} . Os picos no perfil de $\frac{d\phi}{dx}$ indicam uma ZL entre $x = 13.44 \text{ cm}$ e $x = 15.99 \text{ cm}$ (comprimento da ZL = 25.5 mm). Por outro lado, pode ser observado que a dureza do MB nas proximidades da ZL é inferior à dureza de referência (280 HV). Segundo a relação de *Hall-Petch*⁵, isto pode indicar o aumento do tamanho de grão e a diminuição do limite do escoamento. Em comparação ao MB, a dureza começa a aumentar dentro do MS na direção do centro da junta, chegando em um valor máximo de 316 HV . Como o MS é de liga AISD, o comportamento é previsível, dado que os seus valores de resistência mecânica são maiores aos da liga AID do MB. A Figura 92b indica de maneira mais detalhada a queda observada no valor da C_{EF} em função da dureza, sendo coerente com o comportamento esperado entre a dureza e o RMB.

Figura 92 Perfis de $d\phi/dx$ e micro dureza nas proximidades da junta JPE2 (a). Valor do parâmetro C_{EF} em função da dureza na região da solda (b).

A Figura 93 apresenta os resultados do mapeamento da anisotropia magnética na face transversal da mostra JPE2. De maneira muito similar à amostra JPE1, o perfil do parâmetro C_{EF} registrado na amostra JPE2 também exibe um comportamento relativamente simétrico em relação ao centro da amostra. A Tabela 14 apresenta os pontos mais relevantes deste perfil do C_{EF} .

Tabela 14 Pontos principais no perfil do C_{EF} (JPE2)

Distância (cm)	C_{EF} (V)	Local
2.80	3.13	Início
8.99	4.75	máx 1
12.48	1.14	Metade do MS
16.21	4.39	máx 2
21.42	2.65	Fim

Neste caso, os picos no perfil do C_{EF} também aparecem em intervalos regulares, aproximadamente a $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$ do comprimento total da amostra (Distância entre picos do $C_{EF} = 7.21\text{ cm}$). Os picos do C_{EF} , neste caso também dão indícios de níveis altos de tração relativa nas regiões de refino microestrutural, enquanto a diminuição do C_{EF} nas proximidades da ZL, pode ser indício tanto de uma queda no nível de tensão residual quanto do crescimento de grão no MB. Já que a liga de solda utilizada em ambas as juntas é a mesma, são observados os mesmos efeitos de JPE1 no MS. Se ao valor mínimo C_{EF} , registrado no ponto final do perfil, lhe fosse assignado um nível de tensão residual (consequência da operação de solda) nula, os picos do perfil de C_{EF} indicariam regiões nas quais predominam as tensões residuais de tração, enquanto que no intervalo entre $x = 10.41\text{ cm}$ e $x = 14.78\text{ cm}$, prevaleceria a tensão compressiva.

Também na Figura 93 é ilustrado o perfil do parâmetro ϕ registrado na amostra JPE2, onde também existem mudanças em direção do centro da junta de solda, porém sem ser tão drásticas quanto as que foram observadas à direita do perfil de ϕ na amostra JPE1. Estas mudanças começam em locais mais próximos da linha de centro, do lado esquerdo entre $x = 11.51\text{ cm}$ e $x = 12.2$ em direção do MS, com uma inclinação de aproximadamente $-3^\circ/\text{mm}$. Do lado direito entre $x = 13.85\text{ cm}$ e $x = 13.43\text{ cm}$ em direção do MS com uma inclinação de aproximadamente $1.8^\circ/\text{mm}$. Estas mudanças podem indicar a presença de um gradiente microestrutural de ambos os lados da solda. Adicionalmente, a Figura 93 também

ilustra os mapas de anisotropia magnética, tanto nos extremos da linha de mapeamento, quanto nos valores pico e na metade da junta de solda.

Figura 93 Perfís de ϕ e C_{EF} medidos na face transversal da mostra JPE2

A Figura 94a apresenta o perfil de $\frac{d\phi}{dx}$ nas proximidades da junta de solda na amostra JPE2. As mudanças bruscas detectadas no sentido do MS, provavelmente indicam as fronteiras da ZL, compreendida entre $x = 11.71\text{cm}$ e $x = 13.23\text{cm}$ (*comprimento da ZL = 15.2mm*). Por outro lado, na Figura 94b pode ser observado que a dureza do MB nas proximidades da ZL é inferior à dureza de referência (285 HV), coerente com o aumento do tamanho das fases observado na análise micro estrutural (Figura 90). A dureza aumenta dentro do MS na direção do centro da junta, e atinge um valor máximo de 360 HV.

Figura 94 Perfil de $d\phi/dx$ nas proximidades da junta JPE2 (a). Perfil de micro dureza na região da solda (b).

Mesmo sem ter uma correlação quantitativa com a tensão, os padrões do C_{EF} para ambas as amostras se assemelham com a Figura 88e, onde o encolhimento, a têmpera e a transformação surtem efeito na distribuição de tensão residual. Contudo, apesar de ambas as composições químicas do MB serem muito similares, e do MS ser o mesmo, as diferenças em espessura, de geometria do bisél, do número de passes de solda e as técnicas utilizadas para depositá-la, fazem com que o fluxo de calor seja diferente para cada caso, influenciando nas discrepâncias entre os picos do C_{EF} para cada amostra. No entanto, as diferenças entre estes picos são menores na amostra JPE2 em relação à amostra JPE1. Foi observado que em

ambos os casos, a provável distribuição de tensão residual foi afetada pela mudança espacial de ϕ , isto é, mudanças mais suaves e gradativas deste parâmetro ao longo de distâncias maiores deram lugar a valores mais altos do C_{EF} (tensão residual), enquanto mudanças bruscas de ϕ em distâncias pequenas surtem o efeito contrario. Estas mudanças podem ser originadas pelo crescimento direcional dos grãos no MB após um possível sobreaquecimento, provavelmente devido a uma velocidade de solda inadequada, gerando tamanhos de grão um pouco acima do ideal, amolecendo o material entre o MS e a zona de refino micro estrutural.

Provavelmente o lado direito da amostra JPE1 não sofreu variações de calor tão severas, mas para confirmar esta hipótese, se requereria uma avaliação mais detalhada da evolução da dureza ao longo da linha de mapeamento RMBCR, assim como uma análise metalográfica mais detalhada, pelo menos na região compreendida entre os picos do C_{EF} .

A correlação entre parâmetros escalares derivados do sinal RMBCR e a tensão mecânica uniaxial não é suficiente para traduzir os valores do C_{EF} em valores de tensão residual, já que o campo de tensão está influenciado pela interdependência entre os gradientes dos parâmetros metalográficos ao redor da solda.

Na literatura, existem estudos nos quais é feita uma correlação entre os níveis de tensão residual e valores escalares derivados do RMB, baseada na resposta do material em tensão utilizando magnetização uniaxial^{8; 23; 69; 70}. No entanto Ilker⁶⁹ corroborou que esta metodologia pode levar à obtenção de valores de tensão residual erráticos, em alguns casos, acima do limite de resistência do material. Isto é devido em parte, pelo fato desse tipo de ensaios só ser favorável em casos nos quais a tensão (usualmente aplicada na DL) é aproximadamente paralela à orientação da magnetização.

Dessa maneira, seria mais adequado fazer ensaios no MB tanto em condições inalteradas, para ter um estado de referência, quanto em diferentes condições que simulam os principais tipos de microestrutura encontrados dentro da ZTA. Por outro lado, como foi comprovado mediante o uso de RMBCR, o estado de tensões na seção transversal a solda, é bidimensional, dessa forma, seria mais adequada fazer uma comparação entre anisotropia magnética e uma técnica estabelecida, como por exemplo a extensometria (furo cego). Usando a correlação entre os estados de tensão biaxial para as diferentes condições do MB encontradas

na ZTA, poderia ser elaborado um modelo para prever de maneira quantitativa, as distribuições de tensão residual nos materiais utilizados neste capítulo. Mesmo a correlação sendo complexa, caso seja bem sucedida, poderia ser uma alternativa muito mais econômica, rápida e prática do que a aplicação de técnicas tais como a difração de raios X ou difração de nêutrons. Além disso, esse tipo de previsão poderia prover informações valiosas para ser utilizadas em outras ferramentas de análise, como por exemplo, a análise por elementos finitos (FEA).

Mesmo sem o modelo para prever o campo de tensões residuais, a forma dos perfis do C_{EF} e de ϕ poderiam ser utilizados para aperfeiçoar os parâmetros de soldagem, realizando alterações e avaliando os resultados em termos da simetria do C_{EF} e a homogeneidade de ϕ . Além disso, os comprimentos entre as zonas de ligação, obtidos por meio dos parâmetros derivados do RMBCR podem ser utilizadas em operações de controle dimensional, por exemplo, para avaliar a qualidade da solda.

9.4 Conclusões

O método RMBCR foi utilizado satisfatoriamente para correlacionar o perfil do C_{EF} com padrões conhecidos de tensão residual em juntas de solda que possuem seções transversais semelhantes às utilizadas neste capítulo.

A utilização do perfil do C_{EF} identificou pontos chave nas amostras, indicando os prováveis locais de máxima e mínima tensão residual.

O perfil de ϕ deu indícios da presença de gradientes bidimensionais, tanto microestruturais quanto de tensão residual. O perfil $\frac{d\phi}{dx}$ provou ser sensível às variações observadas na análise metalográfica e de dureza. O espaçamento entre os picos de $\frac{d\phi}{dx}$ no MB nas proximidades da solda, foram utilizados para estimar o comprimento da ZL.

Para a amostra JPE1, na qual o mapeamento de RMBCR e da dureza foram levados a cabo em locais muito próximos, pôde se estabelecer uma correlação entre o valor do C_{EF} e o valor da microdureza, exibindo um comportamento coerente com o reportado na literatura.

Foi observado que as mudanças mais suaves e gradativas de ϕ ao longo de grandes distâncias deram lugar a valores mais altos do C_{EF} (tensão residual),

enquanto mudanças bruscas de ϕ em distâncias pequenas surtem o efeito contrario. Estas tendências podem indicar o uso de parâmetros de solda inadequados.

É necessário estabelecer uma metodologia de calibração para chegar a um modelo adequado de correlação entre a anisotropia magnética, medida por meio do RMBCR, e os campos de tensões residuais decorrentes de processos de soldagem. No entanto, o uso da magnetização rotacional, além de fornecer informações mais ricas, é imune aos erros decorrentes em praticas nas quais ensaios de tensão uniaxial são utilizados para calibrar a resposta do RMB clássico.

Um bom modelo de correlação poderia potencialmente gerar uma alternativa de END para à avaliação de juntas de solda, económica, prática e rápida.

10 Produção científica e técnica

As seguintes produções foram realizadas ao longo do presente trabalho.

- Artigo em revista
CALDAS-MORGAN, M.; PADOVESE, L. R. Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method. **NDT & E International**, v. 45, n. 1, p. 148-155, 1// 2012. ISSN 0963-8695.
- Artigo em anais de congresso
CALDAS-MORGAN, M.; PADOVESE, L. **Real-time non-destructive inspection of stress-induced anisotropy using Magnetic Barkhausen Noise**. The 16th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE'2011) Chennai, India.: IOS Press, 2011. 47-53 p.
- Patente de invenção
Título: “Equipamento para medição de anisotropia magnética em tempo real”
Pedido de patente depositado em 2012 no Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI/SP conforme nº. BR 10 2012 026665-2.

Outras publicações estão sendo preparadas, e deverão ocorrer no decorrer do ano de 2013.

11 Conclusões

Conforme o descrito no objetivo, neste trabalho foi desenvolvida uma técnica de END magnéticos baseada no efeito Barkhausen, denominada de Ruído Magnético de Barkhausen Contínuo Rotacional (RMBCR). Esta técnica foi utilizada de maneira satisfatória para realizar medições de anisotropia magnética de alta resolução angular, em tempo real, ultrapassando as limitações técnicas do RMB clássico. Mediante o uso do RMBCR foi possível obter parâmetros, tais como, a orientação do eixo de fácil magnetização, utilizando um processamento de sinais que requer somente alguns décimos de segundo. As medições de anisotropia magnética foram caracterizadas por um conjunto de parâmetros derivados do sinal RMBCR. Já que o método RMBCR utiliza uma magnetização rotacional de valor fixo, fornecida por um par de ímãs permanentes, não é necessário o uso de amplificadores de corrente na configuração experimental, fazendo com que o consumo energético do equipamento RMB seja consideravelmente baixo. A configuração experimental do método RMBCR é muito simples quando comparada com outros métodos utilizados para gerar magnetização rotacional, tais como arranjos de eletroímãs ortogonais.

Os sinais de RMBCR são afetados pelo ângulo de atraso $\theta_{\bar{B}H'}$ associado a processos de magnetização rotacional. No entanto, a sonda RMBCR oferece a possibilidade mudar tanto a frequência de excitação, quanto a intensidade da mesma, para compensar este atraso.

Foi determinado experimentalmente, que a faixa de frequências de magnetização mais adequada para obter os sinais RMBCR, esta entre os $5Hz$ e os $20Hz$. A intensidade de magnetização é regulada mediante a mudança do espaçamento κ entre os ímãs e a superfície da amostra. O valor κ ótimo corresponde com o ponto no qual o atraso é aproximadamente 0° . Este ponto é determinado utilizando magnetização tanto em sentido horário quanto anti-horário. A escolha das condições de magnetização inadequadas pode fazer com que o mapa de anisotropia gerado não seja uma representação fiel da distribuição da anisotropia magnética presente na amostra.

A técnica RMBCR foi utilizada para realizar medições de tensão mecânica uniaxial contínua, monitorando as alterações da anisotropia magnética decorrentes da mesma. O comportamento dos parâmetros RMBCR, em relação à tensão, foi coerente com resultados de medições angulares de RMB clássico, reportados na literatura para versões discretas do mesmo tipo de carregamento.

A presença de um gradiente de anisotropia magnética em uma superfície de aço, consequência de um carregamento biaxial, foi detectada qualitativamente por meio do método RMBCR. Algumas características da forma da distribuição de anisotropia magnética, registrada em vários pontos de medição nesta superfície, foram utilizadas como uma estimativa da orientação do campo de tensões biaxiais. A orientação do eixo fácil, teve uma boa correspondência com a direção dos ângulos principais, obtida utilizando tanto extensometria quanto simulações por elementos finitos.

Posteriormente, foram conduzidos experimentos nos quais foi acompanhado um processo de carregamento biaxial contínuo em tempo real. Os parâmetros RMBCR confirmaram que para cada estado de tensão biaxial registrado durante o experimento, existe uma distribuição de anisotropia magnética única. O parâmetro C_{EF} apresentou várias regiões de crescimento linear em relação a σ_1 . Os ângulos ϕ e θ_p apresentaram comportamentos muito similares, no entanto havendo um leve desvio entre eles. Este desvio foi atribuído aos efeitos da anisotropia inicial. Durante o processo, o parâmetro *Energia Total* RMB de rotação cresce com o aumento de σ_1 . Os parâmetros de proporção, de energia e de forma, indicaram que as mudanças de anisotropia magnética que ocorrem durante o processo podem ser utilizadas para identificar diferentes estados de tensão mecânica. Já que para cada estado de tensão houve uma distribuição de anisotropia magnética única, existe a possibilidade de utilizar técnicas de reconhecimento de padrões para a detecção de estados de tensão.

Aproveitando a capacidade do método RMBCR de gerar resultados em tempo real, foram realizados mapeamentos de anisotropia magnética de maneira dinâmica, mediante o deslocamento da sonda RMBCR ao longo de superfícies soldadas, com o objetivo de identificar regiões de heterogêneas, possivelmente associadas com a ZTA. Foi possível comprovar que a evolução do parâmetro C_{EF} ao longo da trajetória de mapeamento apresenta um perfil que se enquadra com padrões conhecidos de tensão residual em seções transversais de juntas de solda semelhantes às utilizadas

nos experimentos. Mediante este perfil foi possível identificar os locais nos quais provavelmente existem níveis máximos e mínimos de tensão residual. Por outro lado, o perfil de ϕ deu indícios da presença de gradientes bidimensionais, que podem ser tanto de microestrutura quanto de tensão residual. O perfil $\frac{d\phi}{dx}$ provou ser sensível às discontinuidades observadas na análise metalográfica e de dureza na ZL. O espaçamento entre os picos do perfil de $\frac{d\phi}{dx}$ registrados no MB nas proximidades da solda, foram utilizados para estimar o comprimento da ZL. As características microestruturais tais como tamanho de grão e dureza, tiveram um efeito coerente com o reportado por outros autores em relação ao RMB.

O RMB é um método relativo, é a variante RMBCR não é diferente. Para estabelecer relações quantitativas entre as características monitoradas e os parâmetros derivados da anisotropia magnética registrada, é necessário estabelecer uma metodologia de calibração para chegar a um modelo adequado de correlação. Esta metodologia poderia ser utilizada para estudar não somente estados de tensão, como também alterações microestruturais (decorrentes, por exemplo, de procedimentos de solda, de tratamentos térmicos ou superficiais), estados de deformação plástica, acompanhar processos de degradação térmica, química, ensaios de fadiga, controle de qualidade de acabamento ou dimensional, entre outros. As possibilidades são bastante amplas.

12 Trabalhos futuros

Visando um refinamento do método RMB, é sugerido:

A utilização de conjuntos de amostras de um mesmo material em diferentes condições microestruturais, geradas sob condições controladas e caracterizadas de maneira minuciosa por meio de técnicas pertinentes. Isto com o objetivo de estabelecer comparações com as medições de RMBCR, que permitam identificar características inerente a cada condição.

O uso do método RMBCR no estudo das alterações de anisotropia magnética originadas por diferentes estados de tensão biaxial, mediante o procedimento proposto na seção 8.3.1. Neste procedimento seria escolhido um valor σ_2 fixo para realizar medições de RMBCR contínuas para diferentes valores de σ_1 . Posteriormente repetindo o processo para diferentes acréscimos de σ_2 , sempre dentro do limite de escoamento do material.

A utilização do banco de dados resultante dos ensaios de tensão biaxial, para alimentar algoritmos de reconhecimento de padrões, que possibilitariam a detecção de estados de tensão biaxial somente utilizando a forma da anisotropia magnética.

O estudo da resposta dos materiais em ensaios de tensão mecânica nos quais é ultrapassado o limite de escoamento, já que neste trabalho, todos os experimentos relacionados com a aplicação de tensão mecânica, foram realizados dentro dos limites de elásticos dos materiais.

Referências

- ¹ BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. Wiley, 1993. ISBN 9780780310322.
- ² CHIKAZUMI, S.; GRAHAM, C. D. **Physics of ferromagnetism**. Clarendon Press, 1997. ISBN 9780198517764.
- ³ CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. Wiley-IEEE Press, 2008. 568
- ⁴ JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. 1st Edition. New York: Chapman and Hall, 1991. 440
- ⁵ DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. McGraw-Hill, 1976. ISBN 9780070168916.
- ⁶ BUNGE, H. Texture and magnetic properties. **Textures and Microstructures**, v. 11, p. 75-91, 1989.
- ⁷ STEFANITA, C. G. **From bulk to nano : the many sides of magnetism**. Berlin: Springer, 2008. ISBN 9783540705475 3540705473.
- ⁸ GAUTHIER, J.; KRAUSE, T. W.; ATHERTON, D. L. Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique. **NDT & E International**, v. 31, n. 1, p. 23-31, 1998. ISSN 0963-8695.
- ⁹ PÉREZ-BENITEZ, J. A. et al. Investigation of the magnetic Barkhausen noise using elementary signals parameters in 1000 commercial steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 263, n. 1-2, p. 72-77, 2003. ISSN 0304-8853.
- ¹⁰ RANJAN, R.; JILES, D.; RASTOGI, P. Magnetic properties of decarburized steels: An investigation of the effects of grain size and carbon content. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 23, n. 3, p. 1869-1876, 1987. ISSN 0018-9464.
- ¹¹ CAPÓ-SÁNCHEZ, J. et al. Dependence of the magnetic Barkhausen emission with carbon content in commercial steels. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 4, p. 1367-1370, Feb 2004. ISSN 0022-2461.
- ¹² NG, D. H. L. et al. Nondestructive evaluation of carbon contents and microstructures in plain carbon steel bars by Barkhausen emission. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 37, n. 4, p. 2734-2736, Jul 2001. ISSN 0018-9464.

- ¹³ BARROSO, S. P.; HORVATH, M.; HORVATH, A. Magnetic measurements for evaluation of radiation damage on nuclear reactor materials. **Nuclear Engineering and Design**, v. 240, n. 4, p. 722-725, Apr 2010.
- ¹⁴ MITRA, A.; SAGAR, S. P.; MANIK, N. B. Magnetic Barkhausen emission study in heat-treated Fe-Nb-Cu-Si-B alloy. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 38, n. 6, p. 3669-3674, Nov 2002.
- ¹⁵ LINDGREN, M.; LEPISTÖ, T. Effect of cyclic deformation on Barkhausen noise in a mild steel. **NDT & E International**, v. 36, n. 6, p. 401-409, 2003.
- ¹⁶ SOULTAN, M. et al. Mechanical Barkhausen noise during fatigue of iron. **NDT & E International**, v. 39, n. 6, p. 493-498, 2006.
- ¹⁷ STEFANITA, C. G.; ATHERTON, D. L.; CLAPHAM, L. Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel. **Acta Materialia**, v. 48, n. 13, p. 3545-3551, 2000. ISSN 1359-6454.
- ¹⁸ TUMANSKI, S. Induction coil sensors - a review. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 3, p. R31, 2007. ISSN 0957-0233.
- ¹⁹ JILES, D. C. The effects of stress on magnetic Barkhausen activity in ferromagnetic steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 25, n. 5, p. 3455-3457, Sep 1989. ISSN 0018-9464.
- ²⁰ KRAUSE, T. W.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, D. L. Characterization of the magnetic easy axis in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise. **Journal of Applied Physics** v. 75, n. 12, p. 7983-7988, 1994.
- ²¹ CLAPHAM, L. et al. Characterization of texture and residual stress in a section of 610 mm pipeline steel. **NDT & E International**, v. 28, n. 2, p. 73-82, 1995. ISSN 0963-8695.
- ²² STUPAKOV, O. et al. Investigation of magnetic response to plastic deformation of low-carbon steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 462, n. 1-2, p. 351-354, 2007. ISSN 0921-5093.
- ²³ MOORTHY, V.; SHAW, B. A.; HOPKINS, P. Surface and subsurface stress evaluation in case-carburised steel using high and low frequency magnetic barkhausen emission measurements. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 299, n. 2, p. 362-375, 2006. ISSN 0304-8853.
- ²⁴ FANG, Z.-S.; XIE, N. An analysis of various methods for computing the envelope of a random signal. **Applied Ocean Research**, v. 17, n. 1, p. 9-19, 1995. ISSN 0141-1187.
- ²⁵ JILES, D. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect. **Czechoslovak Journal of Physics**, v. 50, n. 8, p. 893-924, 2000. ISSN 0011-4626.

- 26 MOORTHY, V.; SHAW, B. A.; EVANS, J. T. Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis. **NDT & E International**, v. 36, n. 1, p. 43-49, 2003. ISSN 0963-8695.
- 27 DHAR, A.; ATHERTON, D. L. Influence of magnetizing parameters on the magnetic Barkhausen noise. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 28, n. 6, p. 3363-3366, Nov 1992. ISSN 0018-9464.
- 28 YAMAURA, S.; FURUYA, Y.; WATANABE, T. The effect of grain boundary microstructure on Barkhausen noise in ferromagnetic materials. **Acta Materialia**, v. 49, n. 15, p. 3019-3027, 2001. ISSN 1359-6454.
- 29 PAL'A, J.; BYDŽOVSKÝ, J. Barkhausen noise as a function of grain size in non-oriented FeSi steel. **Measurement**, v. 46, n. 2, p. 866-870, 2013. ISSN 0263-2241.
- 30 PASLEY, R. L. Barkhausen Effect - An Indication of Stress. **Materials Evaluation**, v. 28, n. 7, p. 157-161, 1970.
- 31 JILES, D. C. Review of magnetic methods for nondestructive evaluation. **NDT International**, v. 21, n. 5, p. 311-319, 1988. ISSN 0308-9126.
- 32 _____. The effect of stress on magnetic Barkhausen activity in ferromagnetic steels. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 25, n. 5, p. 3455-3457, 1989. ISSN 0018-9464.
- 33 INAGUMA, T.; SAKAMOTO, H.; HASEGAWA, M. Stress Dependence of Barkhausen Noise in Spheroidized Cementite Carbon Steel. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. PP, n. 99, p. 1-1, 2012. ISSN 0018-9464.
- 34 JAGADISH, C.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, D. L. Influence of uniaxial elastic stress on power spectrum and pulse height distribution of surface Barkhausen noise in pipeline steel. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 26, n. 3, p. 1160-1163, 1990. ISSN 0018-9464.
- 35 _____. Effect of bias field and stress on Barkhausen noise in pipeline steels. **NDT International**, v. 22, n. 5, p. 297-301, 1989. ISSN 0308-9126.
- 36 CHEN, J. et al. Improvement of stress testing performance using Barkhausen noise sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 168, n. 1, p. 51-57, 7// 2011. ISSN 0924-4247.
- 37 KWUN, H. Investigation of the dependence of Barkhausen noise on stress and the angle between the stress and magnetization directions. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 49, n. 3, p. 235-240, 4// 1985. ISSN 0304-8853.

- 38 JAGADISH, C.; CLAPHAM, L.; ATHERTON, D. L. The effect of stress and magnetic field orientation on surface Barkhausen noise in pipeline steel. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 26, n. 1, p. 262-265, 1990. ISSN 0018-9464.
- 39 CLAPHAM, L. et al. Origin of a magnetic easy axis in pipeline steel. **Journal of Applied Physics**, v. 86, n. 3, p. 1574-1580, 1999.
- 40 KRAUSE, T. W. et al. Magnetic Barkhausen noise: Stress-dependent mechanisms in steel. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 32, n. 5, p. 4764-4766, Sep 1996. ISSN 0018-9464.
- 41 CAPÓ-SÁNCHEZ, J.; PÉREZ-BENITEZ, J.; PADOVESE, L. R. Analysis of the stress dependent magnetic easy axis in ASTM 36 steel by the magnetic Barkhausen noise. **NDT & E International**, v. 40, n. 2, p. 168-172, 2007. ISSN 0963-8695.
- 42 KRAUSE, T. W.; MAKAR, J. M.; ATHERTON, D. L. Investigation of the magnetic field and stress dependence of 180° domain wall motion in pipeline steel using magnetic Barkhausen noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 137, p. 25-34, 1994.
- 43 MANDACHE, C.; KRAUSE, T. W.; CLAPHAM, L. Investigation of Optimum Field Amplitude for Stress Dependence of Magnetic Barkhausen Noise. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 43, n. 11, p. 3976-3983, 2007. ISSN 0018-9464.
- 44 CROUCH, A. E.; BEUKER, T. **In-line stress measurement by the continuous Barkhausen method**. Proceedings of IPC 2004, International Pipeline Conference. Calgary, Alberta, Canada 2004.
- 45 CROUCH, A. E.; BURKHARDT, G. L. **System and method for in-line stress measurement by continuous Barkhausen method**. United States Patent 7038444, 2006.
- 46 FRANCO, F. A. **Desenvolvimento de ensaio não destrutivo baseado no ruído magnético de Barkhausen para caracterização de tensões elásticas e deformações plásticas em aços**. 2010. (Doutorado). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- 47 FRANCO, F. A.; PADOVESE, L. R. NDT flaw mapping of steel surfaces by continuous magnetic Barkhausen noise: Volumetric flaw detection case. **NDT & E International**, v. 42, n. 8, p. 721-728, 2009.
- 48 VENGRINOVICH, V. L.; TSUKERMAN, V. L. **Stress and texture measurement using Barkhausen noise and angular scanning of driving magnetic field**. 16th WCNDT 2004 World Conference on NDT. Montreal 2004.

- 49 WHITE, S. A. **A Barkhausen Noise Testing System for CANDU Feeder Pipes**. 2009. (PhD). Department of Physics, Engineering Physics & Astronomy, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.
- 50 ENOKIZONO, M.; NISHIMIZU, A. Effect of thermal fatigue on Barkhausen noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 133, n. 1-3, p. 599-602, 1994. ISSN 0304-8853.
- 51 ENOKIZONO, M.; NISHIMIZU, A.; OKA, M. Estimation of fatigue level by rotational Barkhausen noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 160, p. 43-44, 1996. ISSN 0304-8853.
- 52 ENOKIZONO, M.; TODAKA, T.; YOSHITOMI, Y. Chaotic phenomena of rotational Barkhausen noise. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 215-216, p. 43-45, 2000. ISSN 0304-8853.
- 53 TSUCHIDA, Y.; OKA, M.; ENOKIZONO, M. **Rotational Barkhausen Signals Under Rotating Magnetic Flux**. AIP Conference Proceedings: AIP. 1096: 459-466 p. 2009.
- 54 CALDAS-MORGAN, M.; PADOVESE, L. R. Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method. **NDT & E International**, v. 45, n. 1, p. 148-155, 1// 2012. ISSN 0963-8695.
- 55 TUMAŃSKI, S. New Design of the Magnetizing Circuit for 2D-Testing of Electrical Steel. **Przegląd Elektrotechniczny**, v. 2005, n. 5, p. 32-34, 2005.
- 56 SABIC, D. et al. Dynamics effects on losses due to rotational magnetization. **Przegląd Elektrotechniczny**, v. 87, n. 9b, p. 29-32, 2011.
- 57 KUCZMANN, M. Identification of the 2D vector Preisach hysteresis model. **COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 30, n. 2, p. 538-551, 2011.
- 58 TUMANSKI, S.; FRYSKOWSKI, B. New method of texture and anisotropy analysis in GO SiFe steel. **J. Phys. IV France**, v. 08, n. PR2, p. Pr2-669-Pr2-672, 6// 1998.
- 59 TUMANSKI, S. A method of testing of the plane distribution of anisotropy. **Magnetics, IEEE Transactions on**, v. 38, n. 5, p. 2808-2810, 2002. ISSN 0018-9464.
- 60 GUMAIDH, A. M.; MEYDAN, T.; MOSES, A. J. **Characterisation Of Magnetic Materials Under Two-dimensional Excitation**. Magnetics Conference, 1993. INTERMAG '93., Digest of International. 13-16 Apr 1993, 1993. CD-06-CD-06 p.
- 61 MOSES, A. J. Rotational magnetization-problems in experimental and theoretical studies of electrical steels and amorphous magnetic materials.

- Magnetics, IEEE Transactions on**, v. 30, n. 2, p. 902-906, 1994. ISSN 0018-9464.
- 62 ENOKIZONO, M.; SHIMOJI, H. Vector magneto-hysteretic engineering model. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 161, n. 1–2, p. 136-140, 4/10/ 2005. ISSN 0924-0136.
- 63 PFUTZNER, H. Rotational magnetization and rotational losses of grain oriented silicon steel sheets-fundamental aspects and theory. **Magnetics, IEEE Transactions on**, v. 30, n. 5, p. 2802-2807, 1994. ISSN 0018-9464.
- 64 MAEDA, Y. et al. Rotational power loss of magnetic steel sheets in a circular rotational magnetic field in CCW/CW directions. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 320, n. 20, p. e567-e570, 10// 2008. ISSN 0304-8853.
- 65 TUMANSKI, S. **Handbook of Magnetic Measurements**. Taylor & Francis, 2011. ISBN 9781439829516.
- 66 WEISS, P.; PLANER, V. Hystérèse dans les champs tournants. **J. Phys. Theor. Appl.**, v. 7, n. 1, p. 5-27, // 1908.
- 67 SIEVERT, J. Two-dimensional magnetic measurements – history and achievements of the workshop. **Przegląd Elektrotechniczny**, v. 87, n. 9b, p. 2-10, 2011.
- 68 GOGUE, G. P.; JOSEPH J. STUPAK, J. **A REVIEW OF STEEL MATERIALS IN MOTION DEVICES**. PCIM 1990 conference. Philadelphia, PA, 1990. p.
- 69 ILKER YELBAY, H.; CAM, I.; HAKAN GÜR, C. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. **NDT & E International**, v. 43, n. 1, p. 29-33, 2010. ISSN 0963-8695.
- 70 K. KESAVAN, K. R., S. PARIVALLAL, AND P. SREESHYLA. NON DESTRUCTIVE EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED PLATES USING THE BARKHAUSEN NOISE TECHNIQUE. **EXPERIMENTAL TECHNIQUES**, 2005.
- 71 JU, J.-B. et al. Determination of welding residual stress distribution in API X65 pipeline using a modified magnetic Barkhausen noise method. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 80, n. 9, p. 641-646, 2003. ISSN 0308-0161.
- 72 JANG, J.-I. et al. Assessing welding residual stress in A335 P12 steel welds before and after stress-relaxation annealing through instrumented indentation technique. **Scripta Materialia**, v. 48, n. 6, p. 743-748, 2003. ISSN 1359-6462.
- 73 EASTERLING, K. E. **Introduction to the physical metallurgy of welding**. Butterworth Heinemann, 1992. ISBN 9780750603942.

- 74 GUNN, R. N. **Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications**. Abington Pub., 1997. ISBN 9781855733183.
- 75 LINDGREN, M.; LEPISTÖ, T. Relation between residual stress and Barkhausen noise in a duplex steel. **NDT & E International**, v. 36, n. 5, p. 279-288, 2003. ISSN 0963-8695.
- 76 PARDAL, J. M. et al. Caracterização e avaliação da resistência à corrosão na soldagem de tubulação de aço inoxidável duplex UNS S31803 pelo processo a arco submerso. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, p. 310-321, 2011. ISSN 0104-9224.
- 77 PAVARINO, M. R. C.; ALVAREZ, T. R. **INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA INTERPASSE NAS PROPRIEDADES DO AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX DURANTE A SOLDAGEM PELO PROCESSO A ARCO SUBMERSO**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamenro de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.
- 78 SOUZA, G. C. D. **AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE SOLDAS DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENOFERRÍTICOS**. 2012. Exame de Qualificação. Programa de Pos-Graduação em Engenharia Mecânica, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, Niteroi, RJ.
- 79 RANJAN, R. et al. GRAIN-SIZE MEASUREMENT USING MAGNETIC AND ACOUSTIC BARKHAUSEN NOISE. **Journal of Applied Physics**, v. 61, n. 8, p. 3199-3201, Apr 1987. ISSN 0021-8979.