



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

EMANUEL SEIXAS NASCIMENTO FILHO

**AVALIAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES POR MEDIDAS
NÃO-DESTRUTIVAS ULTRASSÔNICAS E MAGNÉTICAS.**

FORTALEZA

2014

EMANUEL SEIXAS NASCIMENTO FILHO

**AVALIAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES POR MEDIDAS
NÃO-DESTRUTIVAS ULTRASSÔNICAS E MAGNÉTICAS.**

Monografia submetida à coordenação do Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.

FORTALEZA

2014.

EMANUEL SEIXAS NASCIMENTO FILHO

**AVALIAÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES POR MEDIDAS
NÃO-DESTRUTIVAS ULTRASSÔNICAS E MAGNÉTICAS.**

Monografia submetida à coordenação do Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.

Aprovada em __/__/__

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug
Universidade Federal do Ceará

FORTALEZA
2014.

A árvore não prova a doçura dos próprios frutos, o rio não bebe suas próprias ondas, e as nuvens não despejam água sobre si mesma: a força dos bons deve ser usada para benefício de todos.

Sábios Hindus

AGRADECIMENTOS.

A Deus, pelo dom da vida.

A minha Família, pelo apoio incessante e pelas ajudas freqüentes.

Ao Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura, pelo apoio e disponibilidade na orientação deste trabalho e, principalmente pela amizade e confiança depositada em mim desde os primeiros anos de iniciação científica.

Ao Prof. Dr. Lindberg Lima Gonçalves, pela oportunidade de participar do projeto junto a ULB

A todos os Professores do DEMM em especial; Alex Maia do Nascimento, Carlos Almir Monteiro de Holanda, Cleiton Carvalho Silva, Elineudo Pinho de Moura, Enio Pontes de Deus, Francisco Marcondes, Hélio Cordeiro de Miranda, Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, Igor Frota de Vasconcelos, Jeferson Leandro Klug, Lindberg Lima Gonçalves, Marcelo Ferreira Motta, Marcelo José Gomes da Silva, Raimundo Carlos Martins Leite, Ricardo Emilio F. Quevedo Nogueira, Walney Silva Araújo, por todos os ensinamentos técnicos e pela dedicação na construção e fortalecimento do curso de Engenharia Metalúrgica.

A todos os companheiros do CENDE, pela amizade e pelos bons momentos de convivência.

Aos amigos da terceira turma de Engenharia Metalúrgica da UFC; Nathalia Candido Figueiredo, Abraão Danilo, Thiago Ivo, Alfredo Leão, Émerson Miná, Tiago Pontes, Neco Júnior, Cleber Yuri e Fernando Emerson pelos constantes ensinamentos que foram de fundamental importância nestes anos de graduação.

Aos amigos adquiridos durante a graduação, pelo apoio nos momentos difíceis e companheirismo, em especial a Francisco Antonio (Chico), Diego Coelho (Kuen), Henrique Alencar (Presidente), Eudes Rodrigues, Bruno Mynelly, Francisco Leonardo, Pablo Leão, Lucas Lopes, Reinaldo Azevedo, Davi Farias, Lincoln Oliveira.

RESUMO

Avaliações mais confiáveis dos materiais em uso ou após seu processo de fabricação tornam-se necessárias para garantir a integridade dos mesmos. Técnicas não-destrutivas mostram-se viáveis por não causar danos ao material. Neste trabalho, técnicas magnéticas e ultrassônicas foram utilizadas para avaliar tensões residuais em uma barra chata de aço carbono ABNT 1013 submetida a diferentes carregamentos (0.5, 0.6 e 0.7 toneladas). Os sinais foram capturados em diferentes orientações em relação à laminação (0° , 30° , 45° , 60° , 90°). O objetivo do trabalho é observar as mudanças de tais parâmetros magnéticos, ou mudanças da velocidade de propagação da onda ultrassônica, com a aplicação de tensão. Os resultados magnéticos não foram capazes de diferenciar as condições de trabalho empregadas. Os ensaios ultrassônicos mostram melhores resultados em avaliar as tensões.

Palavras-Chaves: Ensaio magnético, Ensaio ultrassônico, Tensão.

ABSTRACT

More reliability of materials evaluation in service or during its manufacture is needed to ensure their integrity. Besides nondestructive techniques are useful for this purpose, they do not affect the material's future usefulness. In this work, magnetic and ultrasonic techniques were used to analyse residual stress in a carbon steel rod (ABNT 1013) under different loads (0.5, 0.6 and 0.7 ton). Both magnetic and ultrasonic signals were acquired in different orientations relative to the rolling direction (0° , 30° , 45° , 60° , 90°). The aim of this work is to observe changes in magnetic parameters or in ultrasonic wave velocity with respect to load applied. While the magnetic measurements did not show to be able to distinguish working conditions studied, the analyses of ultrasonic waves yielded good results.

Keywords: Magnetic test, Ultrasonic test, Residual stress.

Sumario

1	Introdução.....	1
2.	Objetivos.....	2
3.	Revisão Bibliográfica.....	3
3.1	Magnetismo.....	3
3.1.1	Definição de Magnetismo.....	3
3.1.2	Campo Magnético.....	3
3.1.3	Indução Magnética.....	5
3.1.4	Suscetibilidade Magnética.....	5
3.1.5	Permeabilidade Magnética.....	5
3.1.6	Materiais Magnéticos.....	6
3.1.7	Estrutura Magnética.....	8
3.1.8	Momentos Magnéticos.....	8
3.1.9	Domínios Magnéticos.....	9
3.1.10	Processos de Magnetização.....	10
3.1.11	Histerese Magnética.....	11
3.1.12	Anisotropia Magnética.....	12
3.3	Ultrassom.....	14
3.3.1	Tipos de Ondas.....	15
3.3.2	Geração de Ondas.....	16
3.3.3	Técnicas de Inspeção.....	16
3.3.4-	Birrefringência Acústica e Autoelasticidade.....	17
3.4	Tensões Residuais.....	18
3.4.1	Tipos de Tensões Residuais.....	18
3.4.2	Técnicas de medição de tensões residuais.....	19
3.4.3	Efeitos das tensões residuais.....	20

4 Metodologia.....	21
4.1 Ensaios Magnéticos.....	21
4.1.2 Desmagnetização.....	24
4.1.3 Ensaios magnéticos realizados.....	24
4.1.3.1 Anisotropia Magnética.....	24
4.1.3.2 Ciclo de Histerese.....	25
4.1.3.3 Profundidade padrão.....	26
4.1.4 Análise dos dados.....	26
4.1.3.3 RMS da tensão induzida.....	27
4.2 Ensaios Ultrassônicos.....	28
4.2.1 Processamento do Sinal.....	29
4.3 Sistemas de Carga.....	30
5 Materiais.....	31
6 Resultados e Discussões.....	32
6.1 Ensaios Magnéticos.....	32
6.1.1 Anisotropia Magnética.....	32
6.1.2 Ciclo de Histerese.....	34
6.1.3 Análise da Tensão Aplicada e Induzida.....	37
6.2 Ensaios Ultrassônicos.....	42
7 Conclusão.....	44
8. Sugestões para trabalhos futuros.....	44
9 Referências.....	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO EM UMA BARRA MAGNETIZADA	4
FIGURA 2 - ESQUEMA DOS DIPOLOS EM UM MATERIAL DIAMAGNÉTICO	6
FIGURA 3 - ESQUEMA DOS DIPOLOS EM UM MATERIAL PARAMAGNÉTICO.	7
FIGURA 4 - ESQUEMA DOS DIPOLOS EM UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO.	8
FIGURA 5 - MOMENTO MAGNÉTICO CAUSADO PELA TRANSLAÇÃO DO ELÉTRON. (B) MOMENTO MAGNÉTICO DEVIDO À ROTAÇÃO DO ELÉTRON.	9
FIGURA 6 - MOMENTOS MAGNÉTICOS DE UMA MATERIAL ORIENTANDO-SE EM RELAÇÃO AO UM CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO.	9
FIGURA 7 - MUDANÇA DA ORIENTAÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS NA FRONTEIRA DOS DOMÍNIOS.	10
FIGURA 8 - MAGNETIZAÇÃO DE UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO. À MEDIDA QUE O CAMPO MAGNÉTICO AUMENTA, OS DOMÍNIOS MELHOR ALINHADOS COM O CAMPO CRESCEM À CUSTA DOS OUTROS DOMÍNIOS.	10
FIGURA 9 - HISTERESE COMUM.....	11
FIGURA 10 - SISTEMA UTILIZADO POR HEINRICH BARKHAUSEN.	13
FIGURA 11 - SALTOS DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS.	13
FIGURA 12 - ONDAS LONGITUDINAIS.	15
FIGURA 13 - ONDAS TRANSVERSAIS.....	16
FIGURA 14 - TÉCNICAS DE INSPEÇÃO: A) PULSO ECO, B) E C) TRANSPARÊNCIA E D) IMERSÃO.....	17
FIGURA 15 - CLASSIFICAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS E SUA ORDEM DE GRANDEZA.	19
FIGURA 16 - TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS.....	20
FIGURA 17 - SENSOR MAGNÉTICO.	21
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MAGNÉTICOS.....	22
FIGURA 19 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MAGNÉTICOS.	23
FIGURA 20 - CONFIGURAÇÃO UTILIZADA NOS TRANSDUTORES DURANTE INSPEÇÃO ULTRASSÔNICA	28
FIGURA 21 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ULTRASSÔNICOS.	29
FIGURA 22 - SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA.	31
FIGURA 23 - BARRA CHATA DE AÇO ABNT 1013.	31
FIGURA 24 - PERMEABILIDADE MAGNÉTICA RELATIVA EM RELAÇÃO À DIREÇÃO DE LAMINAÇÃO PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS.....	33
FIGURA 25 - APLICAÇÃO DE TENSÃO TRATIVA TENDE A ALINHAR OS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS PARALELAMENTE NA DIREÇÃO DE TENSÃO. A TENSÃO COMPRESSIVA TENDE A ALINHAR OS DOMÍNIOS PERPENDICULARMENTE NA DIREÇÃO DE TENSÃO.	34
FIGURA 26 - SOBREPOSIÇÃO DOS CICLOS DE HISTERESE PARA CINCO DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0 TON.	35
FIGURA 27 - SOBREPOSIÇÃO DOS CICLOS DE HISTERESE PARA CINCO DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0,5 TON.	35
FIGURA 28 - SOBREPOSIÇÃO DOS CICLOS DE HISTERESE PARA CINCO DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0,6 TON.	36
FIGURA 29 - SOBREPOSIÇÃO DOS CICLOS DE HISTERESE PARA CINCO DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0,7 TON.	36
FIGURA 30 - SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS DE TENSÃO APLICADA [VOLT] VERSUS TENSÃO INDUZIDA [VOLT] PARA DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0,0 TON.	38

FIGURA 31 - SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS DE TENSÃO APLICADA [VOLT] VERSUS TENSÃO INDUZIDA [VOLT] PARA DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0,5 TON.	39
FIGURA 32 - SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS DE TENSÃO APLICADA [VOLT] VERSUS TENSÃO INDUZIDA [VOLT] PARA DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0,6 TON.	40
FIGURA 33 - SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS DE TENSÃO APLICADA [VOLT] VERSUS TENSÃO INDUZIDA [VOLT] PARA DIFERENTES ORIENTAÇÕES. CARGA 0,7 TON.	41
FIGURA 34 - VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA ULTRASSÔNICA EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO, PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS.	42

LISTA DE SÍMBOLOS

B - Densidade de Fluxo.

μ_0 - Permeabilidade magnética do vácuo.

i - Corrente elétrica.

π - Parâmetro trigonométrico.

d - Distancia.

H - Campo Magnético.

N - Número de espiras da bobina de excitação.

n - Número de espiras da bobina leitora.

L - Comprimento de uma Bobina.

Φ - Indução Magnética.

A - Área da seção transversal.

X_m - Suscetibilidade Magnética.

M - Campo Magnetizante.

μ - Permeabilidade Magnética do Material.

μ_r - Permeabilidade Magnética Relativa.

V - Tensão induzida

T - Tempo

T_x - taxa de amostragem.

RMS - Raiz Quadrática Media.

α - Angulo

1 Introdução.

Tendo em vista a necessidade de avaliações mais confiáveis dos materiais em uso, ou após seu processo de fabricação, técnicas não-destrutivas são empregadas para avaliação de peças, equipamentos e estruturas. Os END's têm como principal característica avaliar a integridade do material de forma a não danificá-lo para seu uso posterior. Ensaios ultrassônicos e magnéticos resultam em repostas imediatas e com maior confiabilidade e, por essa razão, ganham cada vez mais espaço.

Materiais metálicos podem acumular tensões residuais durante seu processo de fabricação como também em serviço. Tais tensões desempenham um papel importante em relação às propriedades de um material e a possibilidade de falha (fadiga, fratura, corrosão, desgaste, fricção, etc.) (SILVA, C. C., 2006). A preocupação com estas tensões levou ao desenvolvimento de técnicas capazes de avaliá-las.

Algumas técnicas são capazes de correlacionar parâmetros físicos ou cristalográficos com a tensão residual. Difração de raios-X, medidas de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, ruído magnético Barkhausen e outros ensaios são exemplos de técnicas utilizadas para avaliar o estado de tensão do material. As técnicas ultrassônicas utilizadas com esse propósito são baseadas na mudança de velocidade de propagação da onda sônica no material submetido a um carregamento. Esta variação pode ser relacionada ao estado de tensão residual através de constantes elásticas do material.

As técnicas magnéticas vêm ganhando espaço, principalmente nas últimas décadas. A principal razão para esse interesse deve-se ao fato de que o comportamento magnético desses materiais é consideravelmente sensível a mudanças microestruturais do material, o que torna possível uma avaliação do estado de tensões do material, através de mudanças de parâmetros

magnéticos, sem causar danos à integridade do material ou retirada de amostra para análise destrutiva.

Técnicas magnéticas baseadas no ruído de Barkhausen também vêm sendo utilizadas. Tal efeito manifesta-se em materiais ferromagnéticos submetidos a um campo magnético externo alternado, em virtude dos saltos repentinos que os domínios realizam para se orientar ao campo magnético aplicado.

Este trabalho visa avaliar a capacidade de ensaios não-destrutivos magnéticos e ultrassônicos em diferenciar o estado das tensões aplicado ao material, e verificar a viabilidade de tais ensaios serem aplicados em campo.

2. Objetivos.

- ✓ Verificar se técnicas não-destrutivas tais como, ultrassom e ensaios magnéticos, são capazes de determinar o nível de tensão de um corpo de prova submetido a diferentes carregamentos.
- ✓ Verificar se os resultados alcançados pelas técnicas empregadas (ultrassom e ensaio magnéticos) apresentarão correlação entre si.
- ✓ Gerar padrões para análise de tensões residuais por ensaios não-destrutivos.

3. Revisão Bibliográfica.

3.1 Magnetismo.

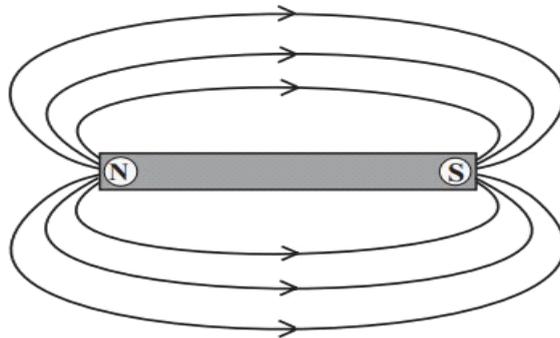
3.1.1 Definição de Magnetismo.

O magnetismo está ligado a minerais capazes de atrair outros objetos. As observações de fenômenos magnéticos naturais são muito antigas. Entre elas relatam-se com frequência as realizadas pelos gregos em uma região da Ásia conhecida por Magnésia. Ainda no século VI a.C., Tales de Mileto, em uma de suas viagens, constatou que pequenas pedrinhas tinham a capacidade de atrair objetos de ferro. Alguns elementos químicos possuem propriedades magnéticas, tais como ferro, níquel e cobalto. Ímãs permanentes, geralmente, contêm ferro na sua composição. Existem ainda outras formas de magnetizar objetos: um fio percorrido por uma corrente elétrica desvia a agulha de uma bússola, devido à existência do campo magnético gerado em torno do fio.

3.1.2 Campo Magnético.

O campo magnético pode ser observado pelos pólos de um ímã. Quando aproximamos pequenas partículas de limalha de ferro de um ímã (Figura 1) observamos a distribuição delas ao redor do ímã, alinhando-se com as linhas de campo. Tais linhas representam o comportamento do campo magnético ao redor do ímã. As linhas de campo indicam a direção e a intensidade de um campo magnético. Linhas muito próximas representam campos magnéticos com maior intensidade do que em regiões com linhas mais afastadas.

Figura 1 - Linhas de campo magnético em uma barra magnetizada



Fonte: Callister.

Como citado, existem outras formas de gerar um campo magnético sem a presença de ímãs. Um fio retilíneo semi-infinito percorrido por uma corrente elétrica i gera um campo magnético de intensidade dado por:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad \text{Equação 1. (Callister)}$$

onde μ é a permeabilidade magnética do meio, e d sendo a distância ao fio. Uma bobina pode ser usada para gerar um campo magnético, sendo que ao longo do seu eixo, este depende do número de voltas da bobina n , do seu comprimento total L , e da corrente aplicada i .

$$H = \frac{ni}{L} \quad \text{Equação 2 (Callister)}$$

Essa bobina, também chamada de solenóide, tem um campo magnético no seu interior uniforme, porém, nas suas extremidades, as linhas de campo têm um comportamento de um ímã permanente.

3.1.3 Indução Magnética.

Se colocarmos uma barra de ferro desmagnetizada dentro de um solenóide, observa-se que o campo magnético fora do solenóide aumenta. Este aumento é devido à soma do campo gerado pelo solenóide e do campo magnético da barra que se magnetizou. O novo campo magnético resultante é chamado de indução magnética, densidade de fluxo ou, simplesmente de indução, e é denotado por **B**. No interior de um solenóide de área transversal A, é obtido um fluxo magnético, dado por:

$$\Phi = H.A \quad \text{Equação 3 (Callister)}$$

É dito como indução magnética a magnitude da força do campo no interior de uma substância, que é submetida a um campo magnético.

3.1.4 Suscetibilidade Magnética.

Definida como uma constante de proporcionalidade entre a magnetização de um material e o campo magnetizante aplicado, é dada por:

$$\chi_m = \frac{M}{H} \quad \text{Equação 4 (Callister)}$$

A suscetibilidade magnética tem um limite dado pela magnetização de saturação, a qual representa o ponto onde todos os momentos magnéticos do material estão alinhados.

3.1.5 Permeabilidade Magnética.

Denominada pela relação entre a indução total **B** e o campo aplicado para produzi-la.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{Equação 5 (Callister)}$$

A permeabilidade depende do local onde o campo está sendo aplicado ou induzido. Geralmente, utiliza-se uma permeabilidade magnética relativa, que é uma proporção da permeabilidade do material em relação à permeabilidade do vácuo.

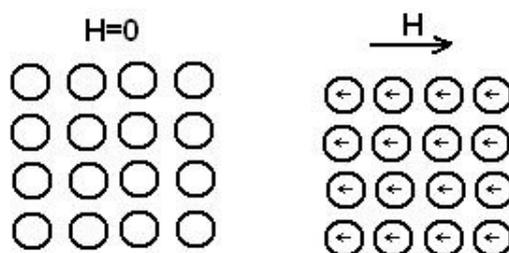
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{Equação 6 (Callister)}$$

Pode-se pensar que a permeabilidade magnética é a medida da facilidade com que um campo B pode ser induzido na presença de um campo magnético externo H .

3.1.6 Materiais Magnéticos.

Os materiais podem apresentar diversas repostas, quando um campo magnético externo é aplicado. Tais respostas podem classificar o material em ferromagnético, diamagnético e paramagnético. Os materiais diamagnéticos (Figura 2) se magnetizam no sentido oposto do campo magnético aplicado. Esse fenômeno decorre por causa de correntes elétricas induzidas nos átomos. A permeabilidade magnética do material é menor que a unidade.

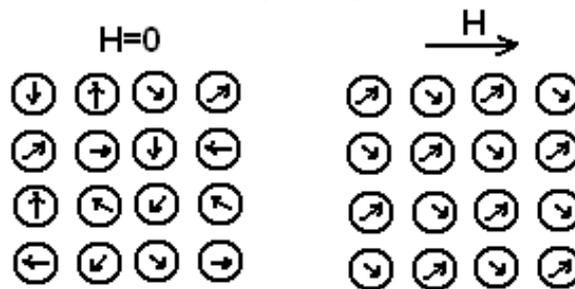
Figura 2 - Esquema dos dipolos em um material diamagnético



Fonte: Callister

Nos materiais paramagnéticos, cada átomo possui um momento de dipolo permanente em virtude do cancelamento incompleto do spin do elétron e/ou dos momentos magnéticos orbitais. Na ausência de um campo magnético externo, as orientações desses momentos magnéticos são aleatórias, de modo que a magnetização líquida de uma porção macroscópica do material é zero. Esses dipolos atômicos estão livres para girar, e o paramagnetismo é resultado do alinhamento desses dipolos com um campo externo, como mostrado na Figura 3. Os dipolos magnéticos são ativados individualmente, sem interação entre dipolos adjacentes. A medida que os dipolos são alinhados com o campo externo, intensifica-o, dando origem a uma permeabilidade relativa, μ_r , maior que a unidade, e a uma pequena, mas positiva, susceptibilidade magnética. A susceptibilidade de materiais paramagnéticos varia de 10^{-5} a 10^{-2} .

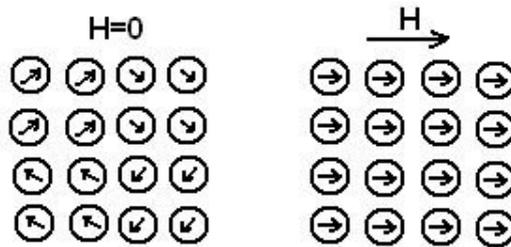
Figura 3 - Esquema dos dipolos em um material paramagnético.



Fonte: Callister

Nos materiais ferromagnéticos, os momentos magnéticos individuais de grandes grupos de átomos ou moléculas são mantidos alinhados, mesmo na ausência do campo externo. Esses grupos são chamados de domínios magnéticos, e agem como um pequeno ímã permanente. Na ausência de um campo aplicado, os domínios têm seus momentos magnéticos distribuídos aleatoriamente.

Figura 4 - Esquema dos dipolos em um material ferromagnético.



Fonte: Callister.

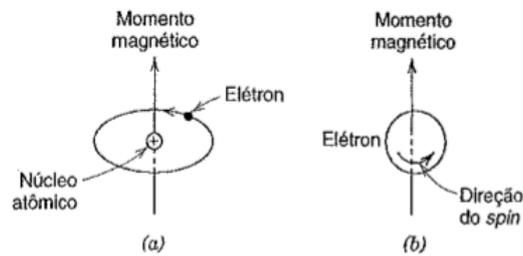
3.1.7 Estrutura Magnética.

Os materiais ferromagnéticos têm sua estrutura definida por pequenas regiões de volume, nas quais os momentos magnéticos estão alinhados na mesma direção. Para a compreensão das propriedades magnéticas, é necessário visualizar a escala atômica dos materiais.

3.1.8 Momentos Magnéticos.

Observando o modelo atômico de forma simplificada, um elétron orbita o seu núcleo atômico de carga positiva, ao mesmo tempo em que gira em torno de seu eixo. O movimento ao redor do núcleo atômico pode ser considerado como um solenóide de uma única espira, gerando um campo magnético ao longo do eixo de translação (Figura 5a). O movimento do elétron girando em seu próprio eixo cria um pequeno campo magnético alinhado com seu eixo de rotação e cujo momento magnético pode ser, apenas, para cima ou para baixo. (Figura 5b). Campos magnéticos externos fazem com que os elétrons alinhem-se ao campo aplicado. Cada orbital pode acomodar até um par de elétrons com spin opostos e desta maneira os momentos magnéticos se anulam. Assim, materiais que possuem orbitais completos apresentam uma resposta fraca ao campo aplicado e são classificados como diamagnéticos. Já materiais cujos orbitais atômicos estão incompletos respondem de modo diferente.

Figura 5 - Momento magnético causado pela translação do elétron. (b) Momento magnético devido à rotação do elétron.

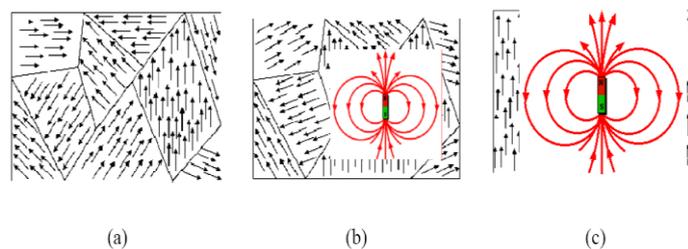


Fonte: Callister

3.1.9 Domínios Magnéticos.

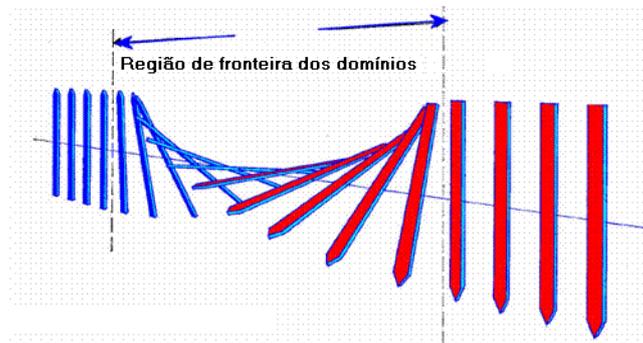
São pequenas porções do material dentro das quais os momentos de todos os dipolos magnéticos estão alinhados numa mesma direção. Eles estão presentes em todos os materiais ferrimagnéticos ou ferromagnéticos abaixo da temperatura crítica, chamada Ponto Curie, a partir da qual a excitação é grande o suficiente para eliminar a orientação espontânea dos momentos magnéticos. Uma amostra macroscópica de material pode conter um grande número de domínios e, a ausência de um campo magnético externo ou residual, todos podem apresentar diferentes orientações de magnetização de modo que a magnetização líquida é nula sua resultante é nula. Entre os domínios existe uma região transitória, denominada parede de domínio, na qual os momentos mudam gradualmente para a orientação do próximo domínio. (Chikazumi, 1964).

Figura 6 - Momentos magnéticos de uma material orientando-se em relação ao um campo magnético externo.



Fonte: Chikazumi, 1964.

Figura 7 - Mudança da orientação dos domínios magnéticos na fronteira dos domínios.

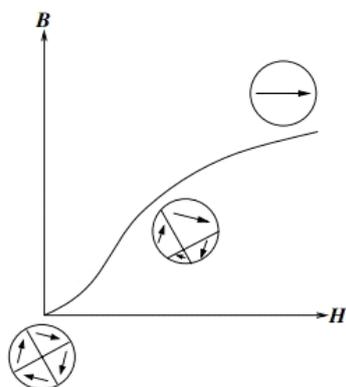


Fonte: Chikazumi, 1964.

3.1.10 Processos de Magnetização.

Quando um material ferromagnético é submetido a um campo magnético externo seus domínios se alinham em relação à direção do campo aplicado, aniquilando os domínios desfavoravelmente orientados, tornando o material em apenas um único domínio (Figura 8). Os processos de magnetização são afetados pelas tensões e defeitos do material, pois atuam como pontos de ancoragem e a energia para que uma parede de domínio ultrapasse um ponto de ancoragem é alta, mudando assim o estado magnético do material.

Figura 8 - Magnetização de um material ferromagnético. À medida que o campo magnético aumenta, os domínios melhor alinhados com o campo crescem à custa dos outros domínios.

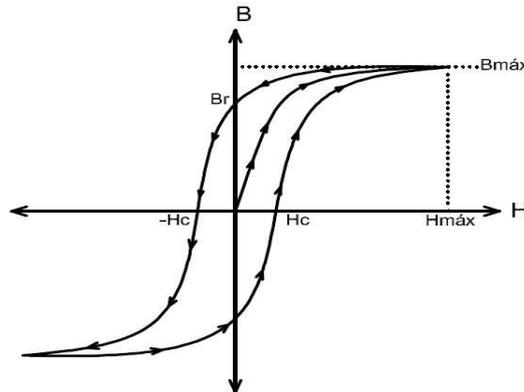


Fonte: Spaldin, 2011.

3.1.11 Histerese Magnética.

A curva traçada a partir da indução magnética, B , produzida em um material em relação a um campo magnético aplicado, H , é conhecida como curva de histerese. Tal curva é sensível a parâmetros, como: temperatura, tensão, frequência de excitação e intensidade do campo, e pode ser utilizada para classificar os materiais em: magnéticos moles, que tem uma resposta rápida, tanto na magnetização e desmagnetização, e os magnéticos duros, que tem uma menor facilidade de serem magnetizados e desmagnetizados. Materiais magnéticos moles apresentam uma menor perda de energia, por possuir uma alta permeabilidade magnética inicial, e também um menor valor do campo coercitivo, fazendo com que o material atinja maiores valores de saturação, diferente dos materiais magnéticos duros. (Buttle, 2006).

Figura 9 - Histerese Comum.



Fonte: Internet.

Os principais parâmetros analisados a partir da curva de histerese são:

- ✓ **B_{\max}** : Campo de indução relativo à magnetização máxima (M_s), saturação.
- ✓ **B_r** : Campo de indução remanescente. Campo remanescente depois da saturação, em $H = 0$.
- ✓ **H_c** : Campo Coercitivo. Campo necessário para levar a indução de volta a zero após a saturação.
- ✓ **H_{\max}** : Amplitude de campo necessário para levar o material a sua saturação magnética ($M = M_s$).

Partindo do estado desmagnetizado do material ($H = 0, B = 0$), o campo de indução segue a curva chamada de “curva inicial”. Aumentar H para H_{\max} leva o material ao estado de magnetização máxima, ou de saturação magnética ($B = B_{\max}$). Depois B diminui para zero (para $H = -H_c$), e finalmente, vai para o estado de indução oposto, quando H é invertida.

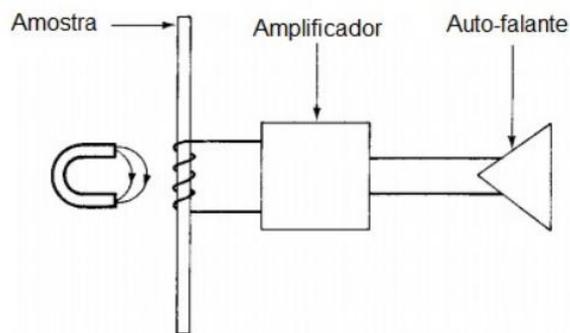
3.1.12 Anisotropia Magnética.

As propriedades magnéticas de um material dependem de muitos fatores. Geralmente, os materiais policristalinos são divididos em regiões que apresentam padrões periódicos. Materiais metálicos policristalinos são formados por grãos que possuem uma orientação definida por suas células unitárias. A magnetização do material é afetada por essa direção, o que atribui ao material uma anisotropia magnética. Vale salientar que a anisotropia pode ser afetada também por estado de tensões do material, discordâncias, domínios magnéticos e heterogeneidade da microestrutura.

3.2- Ruído Magnético Barkhausen.

O efeito magnético Barkhausen é um fenômeno caracterizado pelas variações descontínuas na magnetização de um material ferromagnético, submetido a um campo variável (Bozorth,1951). Pela primeira vez em 1919, Heinrich Barkhausen observou que uma bobina dotada de um núcleo de um material ferromagnético submetida a um campo magnético produz pulsos elétricos perceptíveis por um alto-falante ligado aos terminais da bobina.

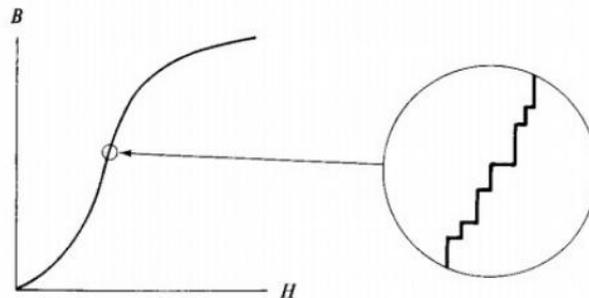
Figura 10 - Sistema utilizado por Heinrich Barkhausen.



Fonte: Buttle, 2006.

O som produzido pelo alto falante, conhecido como ruído magnético de Barkhausen, *RMB*, é produzido pelo movimento de 180° das paredes dos domínios magnéticos. Essa movimentação de paredes ocorre de maneira abrupta, como pode ser observado no detalhe da curva de histerese, e mais intensamente próximo do campo coercitivo, H_c (Jiles, 1988).

Figura 11 - Saltos dos domínios magnéticos.



Fonte: Buttle, 2006.

Esse efeito apresenta-se como saltos irreversíveis das paredes de domínio sobre pontos de ancoragem, tais como: contornos de grão, discordâncias, heterogeneidades ou outras imperfeições. (Cullity, 1972).

O RMB é sensível à deformação elástica, pois esta interfere na movimentação das paredes de domínios. Aplicação de tensão provoca um realinhamento dos domínios magnéticos do material. Domínios magnéticos tendem a se alinhar paralelamente à direção de aplicação de forças trativas e perpendicularmente à direção de tensões compressiva (Buttle, 2006). O RMB é, portanto, sensível ao tipo de tensão aplicada. O estado de tensão do material também interfere na anisotropia magnética (Stefania, 2000).

Um material no regime elástico de deformações tem seus domínios magnéticos rearranjados energeticamente em um estado de mais baixa energia. Submeter um material tracionado a um campo magnético externo ocasiona aumento do sinal de RMB. Caso o material esteja sendo comprimido, o nível do sinal RMB diminui.

A sensibilidade do RMB à variações nas propriedades mecânicas, variações microestruturais e estado de tensões do material torna o RMB útil na caracterização e identificação de amostras de materiais ferromagnéticos.

3.3 Ultrassom.

Técnicas não-destrutivas ultrassônicas são baseadas na produção, propagação, reflexão e recepção de ondas mecânicas de alta frequência. Esta onda, ao percorrer um meio elástico, refletirá ao incidir num meio de diferente impedância acústica, podendo ser uma descontinuidade, falha, vazio, poro, trinca ou interface deste meio com outro. Os métodos ultrassônicos apresentam alta sensibilidade na detecção, localização e dimensionamento de descontinuidades internas do material.

3.3.1 Tipos de Ondas.

O ensaio por ultrassom é realizado com a passagem de ondas mecânicas ou acústicas pelo material. Se considerarmos o meio elástico, ou seja, todas as partículas que o compõe estão rigidamente ligadas, a energia da onda faz com que as partículas do meio oscilem, transmitindo energia para partículas adjacentes. Essas partículas podem oscilar em qualquer direção. Logo, as ondas podem ser classificadas basicamente em três:

Ondas Longitudinais.

São ondas onde as partículas oscilam na direção de propagação da onda. Esse tipo de onda possui uma alta velocidade.

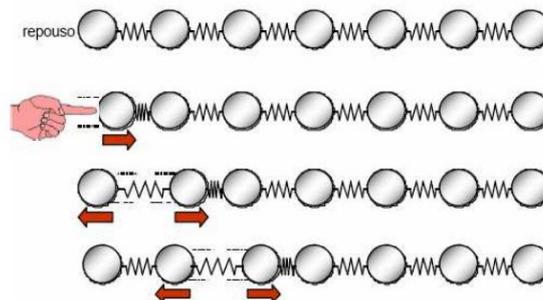
Ondas Transversais.

É definida por causa do sentido de vibração das partículas, pois se propagam em direção perpendicular ao de propagação da onda.

Ondas Superficiais ou Ondas de Rayleigh.

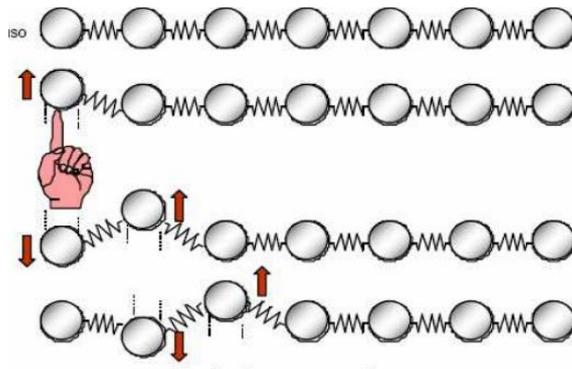
São caracterizadas pelo complexo movimento oscilatório, por se propagarem na superfície dos sólidos.

Figura 12 - Ondas Longitudinais.



Fonte: Andreucci, 2006.

Figura 13 - Ondas Transversais



Fonte: Andreucci, 2006.

3.3.2 Geração de Ondas.

As ondas são geradas por transdutores, podendo ser eletromagnéticos (EMAT) e os piezelétricos. Os mais utilizados são os piezelétricos, que são responsáveis em converter energia elétrica em oscilação mecânica dentro do material. Transdutores piezelétricos requerem a utilização de um acoplante que possibilite a propagação da onda gerada por este para o meio inspecionado.

Os transdutores eletromagnéticos dispensam a utilização de acoplante, são menos suscetíveis a variação de temperatura e umidade, e são geralmente utilizados na indústria ferroviária.

3.3.3 Técnicas de Inspeção.

Existem basicamente três métodos para inspecionar o material por ultrassons, são elas: Imersão, Transparência e Pulso-Eco.

Imersão.

Técnica em que o transdutor (próprio para imersão) e a peça ficam imersos em um meio, permitindo assim um bom acoplamento, e os transdutores podem se mover livremente.

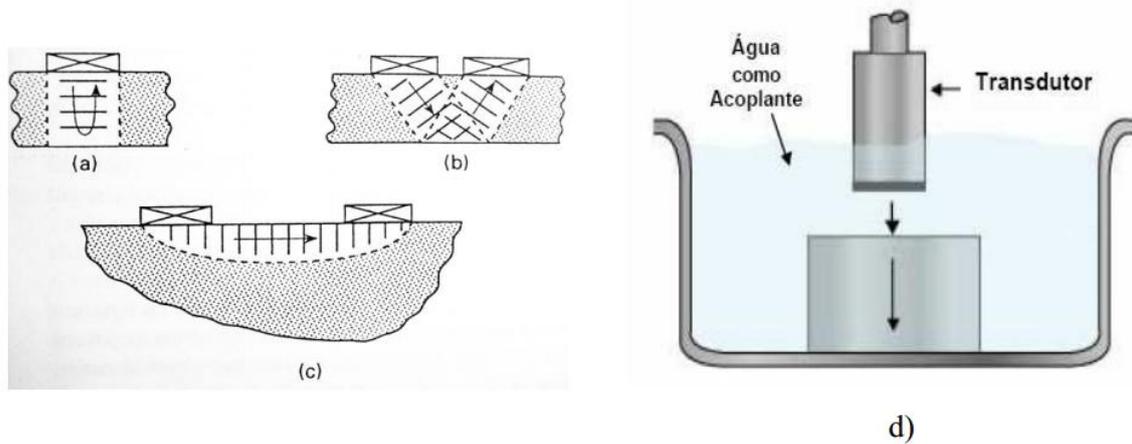
Transparência.

Utiliza-se dois transdutores. Um atua como transmissor e o outro como receptor das ondas ultrassônicas.

Pulso-Eco.

Técnica em que apenas um transdutor emite e recebe ondas que se propagam no material, podendo assim verificar a profundidade da descontinuidade, da dimensão e da localização.

Figura 14 - Técnicas de inspeção: a) pulso eco, b) e c) transparência e d) imersão.



Fonte: Andreucci, 2006.

3.3.4- Birrefringência Acústica e Autoelasticidade.

Para materiais isotrópicos a velocidade de propagação da onda é constante em todas as direções. Materiais anisotrópicos a velocidade de propagação da onda, tanto a onda longitudinal como a transversal, pode sofrer variações.

Este fenômeno pode ser comparado com a birrefringência ótica. Quando um meio homogêneo é anisotrópico, um feixe de luz que o atravessa sofre dupla refração, gerando ondas que apresentam diferentes ângulos de polarização.

Fatores que alteram essa anisotropia do material estão relacionados com sua textura cristalográfica, e seu estado de tensões. Variação na velocidade da

onda, ao percorrer o material elástico sob qualquer tipo de tensão é chamado de “Efeito Acustoelástico”.

3.4 Tensões Residuais.

São tensões auto equilibradas existentes em um corpo livre de forças ou carregamento externos. (Kou, 2002). Estas tensões internas são produzidas em etapas da fabricação do material (Fundição, Laminação, Corte a chama, Forjamento, Usinagem, Soldagem, Brazagem, Tratamentos Térmicos).

As tensões residuais aparecem quando o material sofre um desajuste entre diferentes regiões, como no caso das deformações ou processo térmico, e influenciam no comportamento do material, durante fadiga, fratura e corrosão.

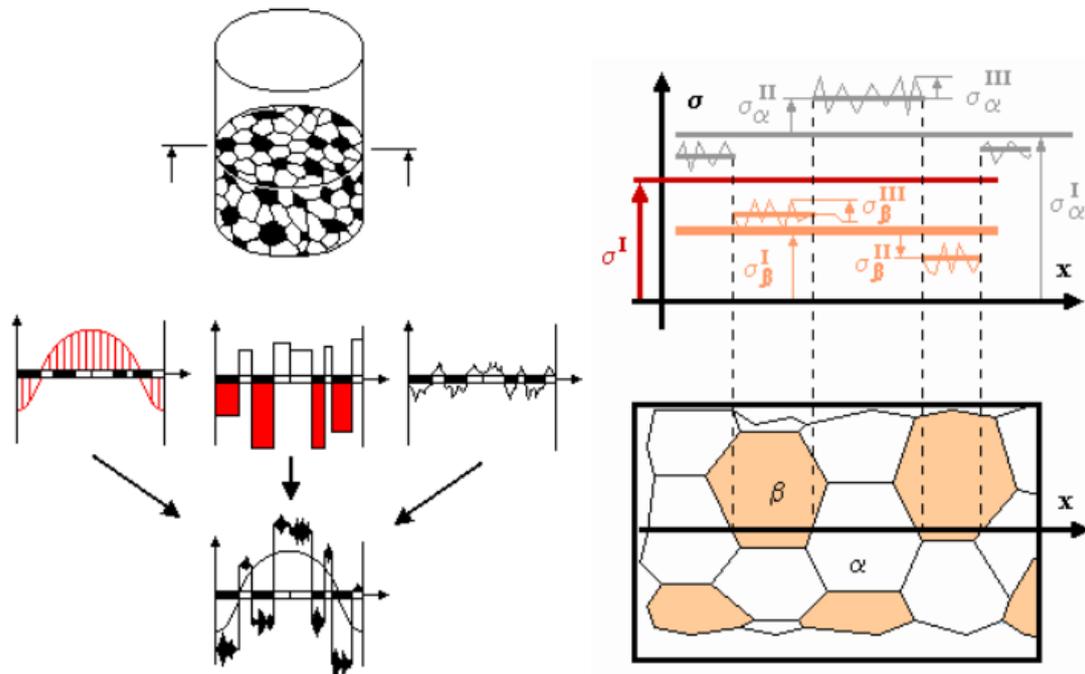
3.4.1 Tipos de Tensões Residuais.

Existem basicamente três tipos de tensões residuais. O primeiro tipo é classificado como macroscópica. Estas tensões residuais variam continuamente ao longo de grandes distâncias, estendendo-se sobre vários grãos dentro do material. (LU 1996).

A segunda categoria de tensões residuais está presente em materiais policristalinos, uma vez que estes materiais apresentam propriedades diferentes em relação aos grãos vizinhos. São denominadas tensões intergranulares, aquelas que ocorrem pela interação entre grãos de fases diferentes e grãos da mesma fase, ou por precipitados ou inclusões.

As tensões do terceiro tipo são de nível submicroscópico, variando sobre algumas distâncias interatômicas, e equilibradas somente em uma pequena parte do grão, tais tensões originam-se pela coerência entre interfaces e campos de discordâncias.

Figura 15 - Classificação das tensões residuais e sua ordem de grandeza.



Fonte: Rosendo, 2005.

3.4.2 Técnicas de medição de tensões residuais.

Existem vários métodos para avaliar as tensões residuais de um material: métodos destrutivos e métodos não-destrutivos. As técnicas destrutivas destroem o estado de equilíbrio do material, e assim mede-se o relaxamento das tensões. As técnicas não-destrutivas relacionam parâmetros físicos para medir as tensões residuais. (Mondenesi, 2001).

Métodos Destrutivos.

Tais métodos determinam as tensões residuais através da destruição de corpos de prova e determinam a deformação elástica residual após o relaxamento das tensões aplicadas. Tal método procede da seguinte maneira: Realiza-se um corte ou um furo, o que gera um alívio de tensões localizadas, e avalia-se a variação da deformação elástica com equipamentos (sensores elétricos, sensores ópticos, strain gages ou extensômetros). Um dos principais métodos é o furo cego, onde são feitas remoção de camadas do material.

Métodos Não-Destrutivos.

As técnicas não-destrutivas utilizadas para avaliar tensões residuais são: (1) a difração de raios-X, que se baseia na observação da variação de parâmetros cristalográficos de regiões da peça com a deformação elástica; (2) o ensaio ultrassônico tem como principal parâmetro a variação da velocidade de propagação da onda no meio com a deformação elástica; e (3) os ensaios magnéticos, que correlacionam tensões residuais com mudanças nas propriedades magnéticas do material deformado elasticamente.

Figura 16 - Técnicas de avaliação de tensões residuais.

Grupo	Técnica
Técnicas de relaxamento de tensão	Técnica de extensômetro elétrico
	Técnica de extensômetro mecânico
	Técnica de revestimento frágil
	Técnica de revestimento fotoelástico
Técnica de difração de raios-X	Difração em filme
	Difração com difratômetro
Técnicas baseadas em propriedades sensíveis à tensão	Técnica com ultra-som
	Técnica com medida de dureza
	Técnica magnética

Fonte: Mondenesi, 2001.

3.4.3 Efeitos das tensões residuais.

Tensões residuais influenciam a aplicação de um material, e dependendo de sua natureza e origem, essa influência pode ser favorável ou desfavorável.

Desfavoráveis.

- Nucleação e crescimento de trincas, quando o material é exposto a ambientes agressivos.
- Empenamento devido à redistribuição das tensões residuais.
- Instabilidade dimensional.
- Diminuição da vida útil do material após ciclos de carregamento.

Favoráveis.

- Aumento na resistência à fadiga do material.
- Alívio das tensões residuais de tração presentes na superfície do material, que poderiam contribuir para a nucleação de trincas de corrosão sob tensão.
- Redução dos efeitos prejudiciais de concentradores de tensão com entalhes, rasgos e descontinuidades superficiais.

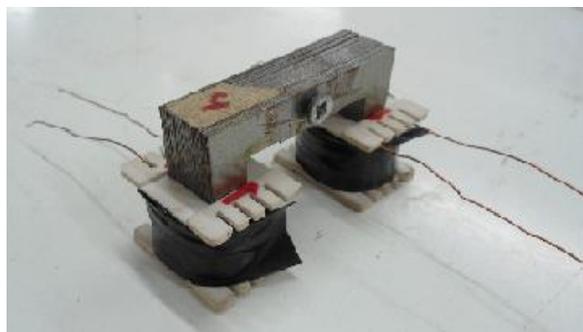
4 Metodologia.

4.1 Ensaios Magnéticos.

Para inferir indiretamente o estado de degradação de um material através do seu comportamento magnético é necessário observá-lo em um estado magnetizado e compará-lo a um padrão estabelecido.

O sensor utilizado neste trabalho (Figura 17), baseado no permeâmetro, consiste em um núcleo ferromagnético em formato de “U”, montado com duas bobinas de fio de cobre. O sensor fecha um circuito magnético com a amostra em estudo. Mais detalhes do sensor magnético estão descritos no item 4.1.3.

Figura 17 - Sensor Magnético.

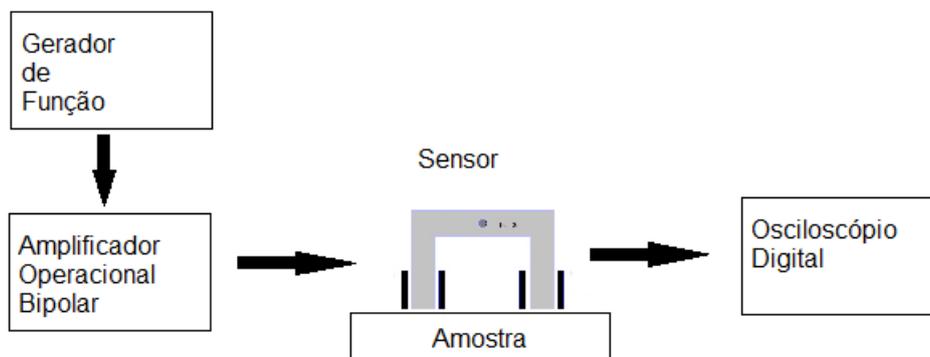


Fonte: Praxedes, 2012.

4.1.1 Equipamentos.

O processo de magnetização e captura da tensão (voltagem) induzida é realizado pelos equipamentos apresentados na figura 18. O gerador de função controla o amplificador operacional bipolar, enviando-lhe uma função como, por exemplo, onda senoidal ou triangular. O amplificador operacional bipolar, por sua vez, aplica uma tensão (voltagem) alternada nos polos da bobina de magnetização, dentro de amplitudes pré-estabelecidas de voltagem e corrente.

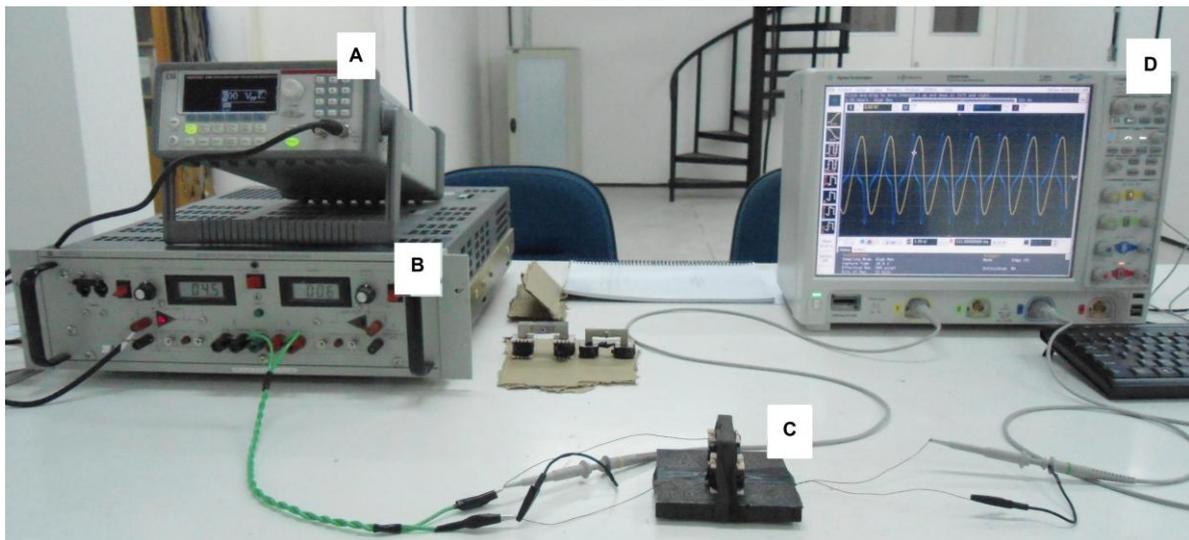
Figura 18 - Representação esquemática do sistema para realização dos ensaios magnéticos.



Fonte: Praxedes, 2012.

Devido à corrente alternada na bobina de excitação, um campo magnético alternado é induzido em uma das pernas do núcleo onde a bobina está enrolada. Através do contato do núcleo com a superfície da amostra, fecha-se o circuito magnético, composto por núcleo e material. Então, sob a influência do campo magnético variável aplicado, o material é magnetizado. O comportamento magnético do circuito é monitorado através da bobina leitora, também enrolada na outra perna do núcleo. A tensão (voltagem) induzida na bobina leitora é monitorada por um osciloscópio, possibilitando também a captura de sinais. Abaixo, a figura 19 mostra a configuração dos equipamentos empregados na inspeção magnética.

Figura 19 - Configuração do sistema para realização dos ensaios magnéticos.



Fonte: Praxedes,2012.

A) Gerador de função (Keithley 3390) – O gerador de função controla o amplificador operacional enviado sinais de excitação senoidais e triangulares. A frequência de excitação do campo magnético foi utilizada em valores menores que 50 Hz. Essa faixa de frequência é justificada devido às menores perdas magnéticas por correntes parasitas e uma maior profundidade padrão eletromagnética.

B) Amplificador operacional bipolar (Kepco BOP 20-20 D): A tensão fornecida pelo gerador de função é amplificada, de modo a prover a corrente necessária para a magnetização. Foram utilizadas correntes de até 3,0 A.

C) Sensor magnético: Descrito anteriormente

D) Osciloscópio digital (Agilent Infinium series): A tensão induzida na bobina sensora é lida pelo osciloscópio. O osciloscópio realiza a captura dos sinais de tensão de magnetização e da tensão induzida necessários para a construção das curvas de histerese.

4.1.2 Desmagnetização.

Para evitar uma magnetização assimétrica e eventuais interpretações equivocadas do estado microestrutural (Buttle et. al, 2006), cada amostra foi desmagnetizada antes de cada medição, utilizando o método descrito em Cullity (1972). O método consiste em submeter à amostra a ciclos de magnetização consecutivos, com amplitude de campo decrescente.

4.1.3 Ensaio magnéticos realizados.

4.1.3.1 Anisotropia Magnética.

O objetivo deste ensaio é fornecer uma avaliação da distribuição de anisotropia magnética do material, observando os eixos de fácil magnetização e correlacionando-os.

Durante o ensaio realizado neste trabalho, a avaliação da anisotropia magnética plana consiste na análise da densidade de fluxo magnético máximo capturado em diferentes direções sobre a amostra. Neste, e em outros ensaios, foi utilizado o sensor constituído de um *yoke* de Fe-Si, com uma bobina de excitação com 200 voltas e uma bobina de leitura com 120 voltas, ambas de fio de cobre AWG 24.

A bobina de excitação foi submetida a uma corrente elétrica de dois ampères. A frequência de excitação foi de 1,0 Hz, um valor baixo para minimizar o efeito das correntes parasitas. A taxa de amostragem foi de 50 kHz, totalizando 20000 pontos por ciclo. O sinal de tensão induzida na bobina leitora foi capturado nas direções de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, em relação à direção de laminação.

A partir dos sinais de tensão induzida na bobina leitora foi possível obter os valores de densidade de fluxo máximo, $B_{máx}$, e permeabilidade magnética

relativa, μ_r , para cada circuito magnético composto por sensor e amostra, necessários a análise das propriedades magnéticas do material.

4.1.3.2 Ciclo de Histerese.

O objetivo deste ensaio é a obtenção do ciclo de histerese e seus parâmetros. A avaliação também é comparativa, e para tanto, os ciclos de histerese das diferentes amostras são obtidos com a mesma densidade de fluxo máxima, de modo que seja possível comparar os valores dos parâmetros magnéticos dos ciclos.

Durante a realização desse ensaio foi utilizado o mesmo sensor desenvolvido para o ensaio de anisotropia, como descrito anteriormente. Novamente, os ciclos de histerese foram obtidos em um regime de baixa frequência de excitação, $f = 1.0$ Hz, de modo a minimizar as perdas por correntes parasitas no material, além de permitir uma mobilidade às paredes de domínio tal que o processo de magnetização seja mais sensível às descontinuidades microestruturais (PRAXEDES, 2012). Foi utilizada uma taxa de amostragem de 50 kHz, fornecendo assim 20000 pontos por ciclo.

O sinal de tensão induzida da bobina leitora foi processado por um filtro passa-baixa, integrado ao osciloscópio, com frequência de corte de 50 Hz, para eliminar os efeitos da frequência da rede.

De cada ciclo de histerese resultante foram retirados parâmetros magnéticos sensíveis à estrutura interna do material, que foram correlacionados com as diferentes posições (0° , 30° , 45° , 60° e 90°) em relação à laminação original do material.

4.1.3.3 Profundidade padrão.

É dada por uma equação que aponta a profundidade do campo magnético aplicado no material, em função da frequência de excitação, condutividade elétrica e permeabilidade magnética do material.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \mu \cdot \omega}} \quad \text{Equação 7}$$

onde: σ é a condutividade elétrica do material, μ é a permeabilidade magnética relativa do material, ω é a frequência angular dada por $2\pi f$, e f é a frequência de excitação. Considerando uma condutividade elétrica de 5×10^{-6} siemens/m, uma permeabilidade magnética relativa de 200 e utilizando uma frequência de excitação de 1 Hz, a profundidade padrão resultante é de 15.9 mm.

4.1.4 Analise dos dados.

Antes das análises de anisotropia magnética e do ciclo de histerese é necessário processar os dados da indução magnética, que é dada pela lei da indução de Faraday (equação 8). A tensão (voltagem) induzida na bobina sensor é diretamente proporcional à derivada temporal do fluxo magnético, Φ . Por sua vez, a densidade de fluxo (equação 9) pode ser calculada a partir da integração da tensão induzida segundo a equação 10. Entretanto, como o sinal obtido é discretizado, utiliza-se integração numérica, e a equação 9 toma a forma expressa na equação 11:

$$V = \frac{n \cdot d\phi}{dt} \quad \text{Equação 8 (Cullity)}$$

$$\Phi = B \cdot A \quad \text{Equação 9 (Cullity)}$$

Temos então:

$$B = \frac{1}{n.A} \int V.dt \quad \text{Equação 10 (Cullity)}$$

Logo:

$$B = \frac{1}{n.A.Tx} \sum V \quad \text{Equação 11}$$

onde: V é a tensão induzida na bobina, Φ é o fluxo magnético, n é o número de espiras da bobina, B é a densidade de fluxo, A é a área da seção transversal da bobina e Tx é a taxa de amostragem.

O ciclo de histerese é construído com os valores de densidade de fluxo, B , calculados a partir da equação 10 *plotados* em relação aos valores de campo magnético, H , calculados pela equação 12:

$$H = \frac{NI}{L} \quad \text{Equação 12 (Callister)}$$

onde: N é o número de espiras da bobina de excitação, I é a amplitude corrente aplicada e L é o percurso magnético médio.

4.1.3.3 RMS da tensão induzida

Os sinais de tensão induzida capturados foram obtidos os valores RMS (raiz quadrática media) por um tratamento matemático segundo a equação 13:

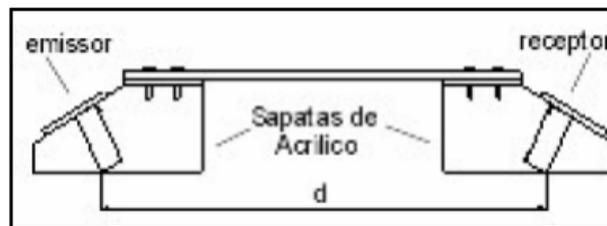
$$RMS = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k V(i)^2 \quad \text{Equação 13}$$

Onde: k o número de elementos do sinal e $V(i)$ é o valor da tensão induzida para o i -ésimo elemento.

4.2 Ensaio Ultrassônicos.

Os sinais ultrassônicos foram capturados durante a inspeção empregando a técnica ultrassônica de tempo de percurso de onda difratada, TOFD (do inglês *time of flight diffraction*). Durante a captura dos sinais foram empregados dois transdutores, um emissor e outro receptor, ambos com frequência central de 5 MHz, como representado na figura abaixo.

Figura 20 - Configuração utilizada nos transdutores durante inspeção ultrassônica



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os transdutores foram posicionados sobre cunhas de acrílico de modo que o feixe sônico incida no aço com ângulo de 60° . A distância entre os transdutores foi determinada utilizando a seguinte equação:

$$d = 2.e.tg(\alpha) \quad \text{Equação 13}$$

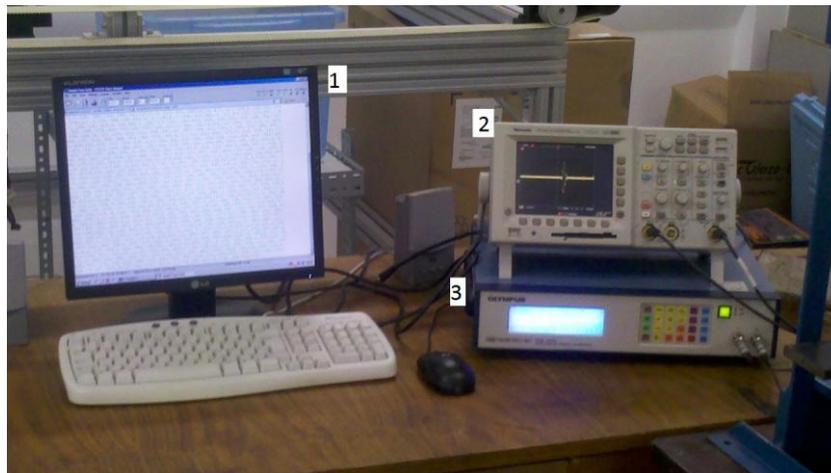
onde: e representa a espessura da peça, d a distância que separa os transdutores e α o ângulo de incidência do feixe sônico no material.

Os sinais ultrassônicos foram capturados nas orientações de 0° , 30° , 45° , 60° e 90° , em relação à direção de laminação. O sistema utilizado na captura de sinais ultrassônicos, apresentado na figura 21, é composto por:

- 1) Um programa para comunicação entre o osciloscópio e o computador (STgold) que permite a captura dos sinais ultrassônicos e posterior processamento para cálculo da velocidade;

- 2) Osciloscópio (Tektronix TDS 3012B) responsável pela apresentação dos sinais produzidos durante a recepção das ondas ultrassônicas.
- 3) Gerador e receptor de ondas ultrassônicas (Olympus PANAMETRICS-NDT Model 5900 PR) para execução do ensaio empregando a técnica TOFD.

Figura 21 - Sistema de aquisição de dados ultrassônicos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2.1 Processamento do Sinal

De modo a obter maior precisão na medida do tempo de percurso da onda ultrassônica, os sinais ultrassônicos capturados foram processados por um algoritmo baseado no método da correlação cruzada (Bittencourt, 2003).

Intuitivamente, o intervalo de tempo decorrido entre dois sinais é medido calculando-se a diferença entre os instantes de ocorrência de dois pontos de referência previamente estabelecidos. Contudo, quando os sinais não são idênticos, a escolha dos pontos de referência deixa de ser trivial, comprometendo a correção dos resultados do método. Como alternativa, tem-se a correlação cruzada, que, desde que aplicável, permite medir o atraso entre sinais, dispensando pontos de referência. Quando implementada em

sistemas digitais, esta técnica tem a resolução de suas medidas, determinada pela taxa de amostragem usada na aquisição dos dados.

De acordo com Papoulis, citado por BITTENCOURT, supondo-se ergodicidade, a correlação cruzada $r(\cdot)$ entre duas sequências $x(\cdot)$ e $y(\cdot)$, defasadas de τ ambas de comprimento L , é estimada, conforme a Equação 14. Demonstra-se que o instante de ocorrência do máximo da sequência $r(\cdot)$ iguala-se ao atraso entre $x(\cdot)$ e $y(\cdot)$.

$$r(n) = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L-1} x(k)y(k + \tau + n). \quad \text{Equação 14 (Bittencourt, 2003)}$$

Uma vez calculado o tempo de percurso da onda, sua velocidade de propagação pode ser determinada pela seguinte equação:

$$V = \frac{2.e}{\Delta t} \left(\frac{1 - \text{sen } \alpha}{\cos \alpha} \right) \quad \text{Equação 15}$$

onde Δt é o intervalo de tempo obtido pelo processamento do sinal ultrassônico.

4.3 Sistemas de Carga.

Para avaliar o efeito das tensões foi utilizado um dispositivo de aplicação de carga no material. O carregamento ocorreu dentro do regime elástico. O sistema de carregamento da barra chata foi realizado com meio de uma prensa hidráulica, marca BONVENAU, modelo P10 ST, com capacidade máxima de 10 ton. A barra foi apoiada na base da prensa de modo a não causar deslizamento. Foram realizados ensaios de flexão com cargas estacionárias de 0,5 ton, 0,6 ton e 0,7 ton.

Figura 22 - Sistema de aplicação de carga.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5 Materiais.

Para a realização dos ensaios magnéticos e ultrassônicos foi utilizado uma barra chata de aço ABNT 1013 com espessura de 12,7 mm ($\frac{1}{2}$ polegada), comprimento de 512 mm e largura de 75 mm. A composição química do aço ABNT 1013 é apresentada pela tabela 1.

Figura 23 - Barra chata de aço ABNT 1013.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 1- Composição química do material.

Elemento	%C	%Mn	%P	%S
Min-Máx	0,11-0,16	0,50-0,800	0,040	0,050

6 Resultados e Discussões.

6.1 Ensaios Magnéticos.

6.1.1 Anisotropia Magnética.

A permeabilidade magnética relativa, μ_r , foi calculada a partir dos valores das tensões aplicada e induzida para cada uma das condições de carregamento aplicado (0 ton, 0,5 ton, 0,6 ton e 0,7 ton) e orientação relativa à direção de laminação (de 0°, 30°, 45°, 60°, 90°). A utilização de coordenadas polares para apresentação dos resultados facilita a identificação da direção de mais fácil magnetização e de possível anisotropia magnética.

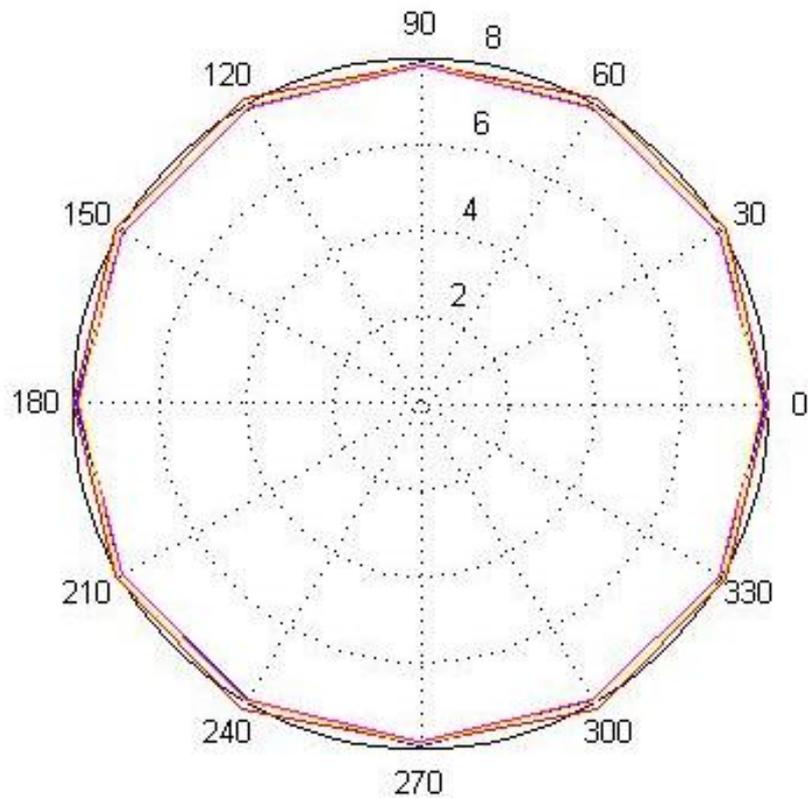
Vale ressaltar que os valores das tensões aplicada e induzida foram medidos em apenas cinco orientações. Considerando que a tensão aplicada é alternada, os valores de μ_r para as demais orientações podem facilmente ser obtidos por simetria (e.g. $\mu_r^{180^\circ} = \mu_r^{0^\circ}$, $\mu_r^{270^\circ} = \mu_r^{90^\circ}$, etc).

De acordo com os resultados obtidos, e apresentados no gráfico da figura 24, não foi possível observar diferenças nos valores de μ_r com a orientação. A sobreposição das curvas produzidas para cada um dos carregamentos aplicados também não revela mudanças significativas devido ao carregamento.

É importante lembrar que durante ensaio de dobramento a região côncava, aquela onde o cutelo exerce a força, está submetida a esforços compressivos, ao passo que a região convexa está submetida a esforços trativos. Ainda para ensaios de dobramento no regime elástico, a linha neutra ou o lugar geométrico que apresenta deformação zero localiza-se na metade da espessura da chapa (Dieter, 1961). Além disso, é sabido que forças trativas tendem a alinhar os domínios magnéticos paralelamente à direção da tensão, enquanto forças compressivas alinham os domínios perpendicularmente à direção da tensão

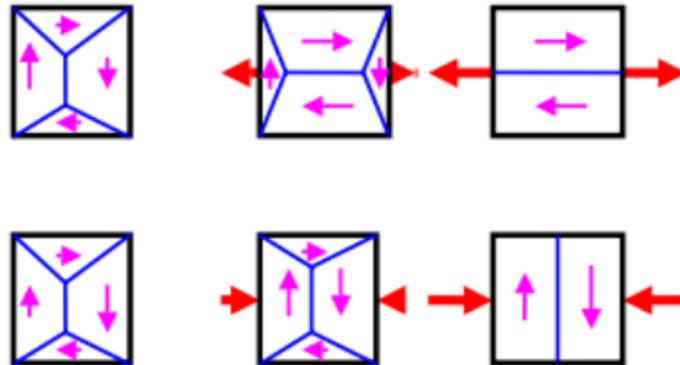
(Figura 25) (Buttle, 2006). Levando em consideração a frequência de excitação utilizada no ensaio, a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética relativa do material do corpo de prova, a profundidade padrão calculada de acordo com a eq. 7 é igual a 15.9 mm e, portanto, maior que a espessura do corpo de prova. Assim, o campo magnético aplicado penetra toda a espessura do corpo de prova e, podemos presumir que os efeitos das forças exercidas sobre os domínios magnéticos presentes na zona comprimida anulam a influência das forças trativas exercida sobre os domínios magnéticos presentes na zona tracionada, o que explica por que não se observa mudanças nos valores de μ_r , mostrados pela figura 24. Infelizmente, não foi possível confirmar essa hipótese pela realização de novas medidas em corpos de prova submetidos principalmente a tensões trativas durante ensaio de tração.

Figura 24 - Permeabilidade magnética relativa em relação à direção de laminação para diferentes carregamentos.



Fonte: Autor.

Figura 25 - Aplicação de tensão trativa tende a alinhar os domínios magnéticos paralelamente na direção de tensão. A Tensão compressiva tende a alinhar os domínios perpendicularmente na direção de tensão.

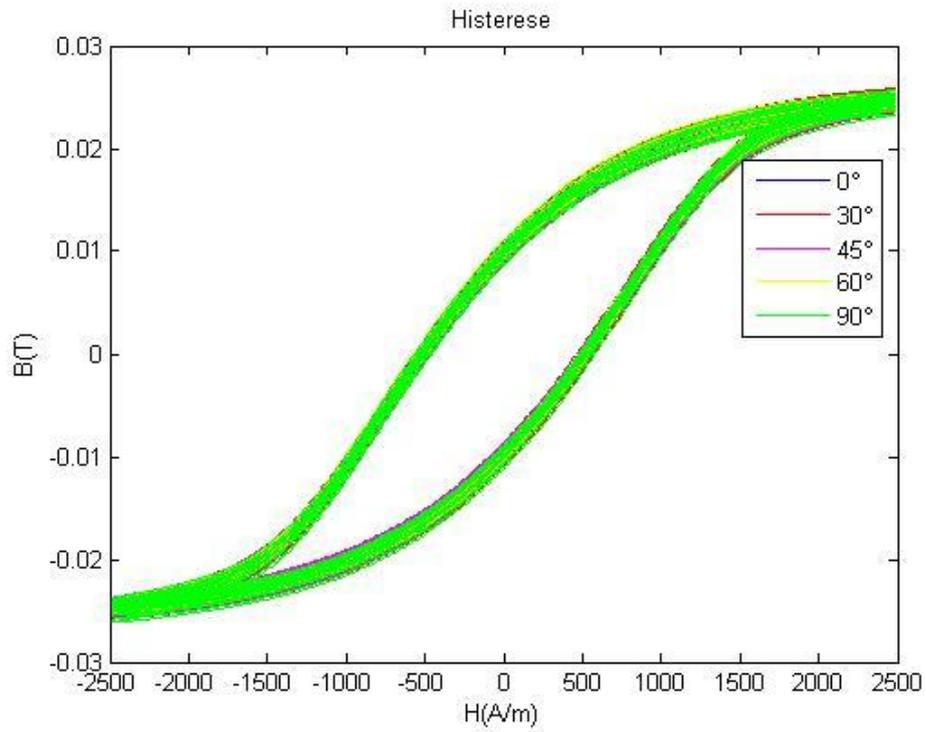


Fonte: Buttle, 2006.

6.1.2 Ciclo de Histerese.

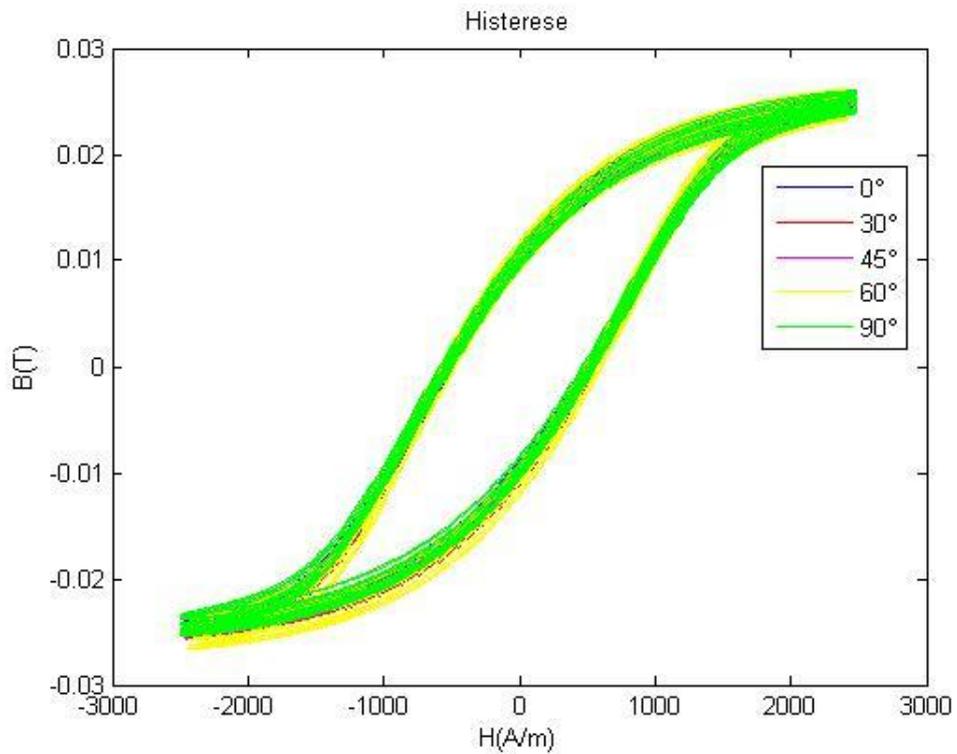
Após o processamento dos dados coletados durante os ensaios magnéticos os valores de campo aplicado, H , e indução magnética, B , calculados como descrito no item 4.1.4 - Análise dos dados. Em seguida, para cada carregamento (0 ton, 0,5 ton, 0,6 ton e 0,7 ton) foram gerados e sobrepostos os ciclos de histerese em função das orientações (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) e que aparecem nas figuras de 26 a 29. A sobreposição dos ciclos de histerese revela que não houve mudanças relevantes dos ciclos obtidos em função das variáveis utilizadas.

Figura 26 - Sobreposição dos ciclos de histerese para cinco diferentes orientações. Carga 0 ton.



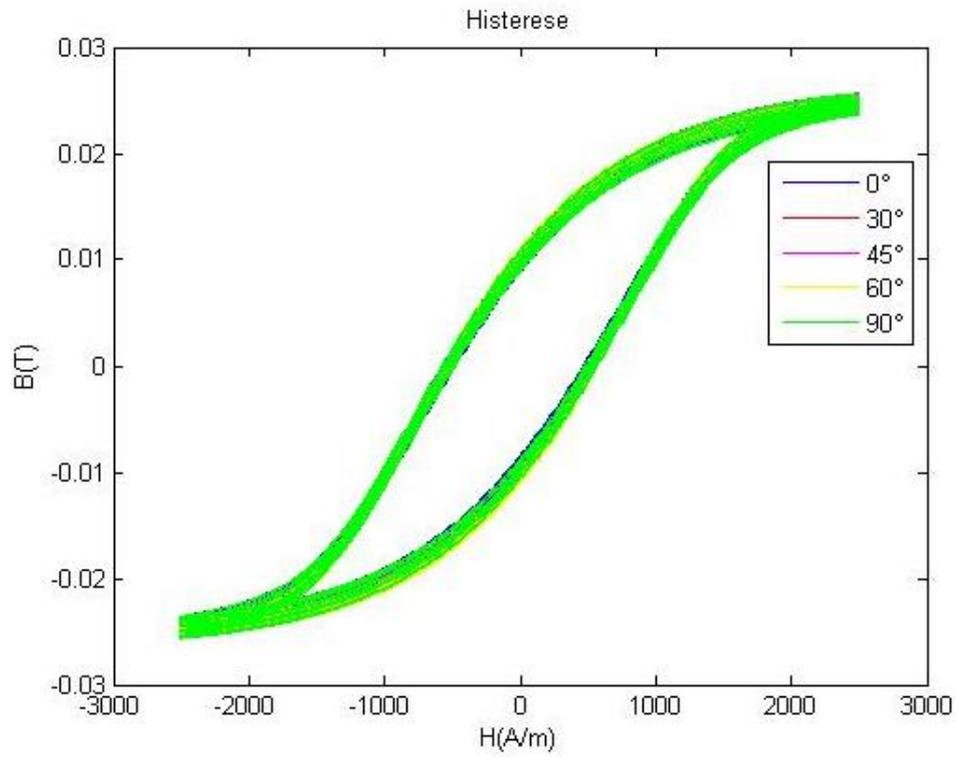
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 27 - Sobreposição dos ciclos de histerese para cinco diferentes orientações. Carga 0,5 ton.



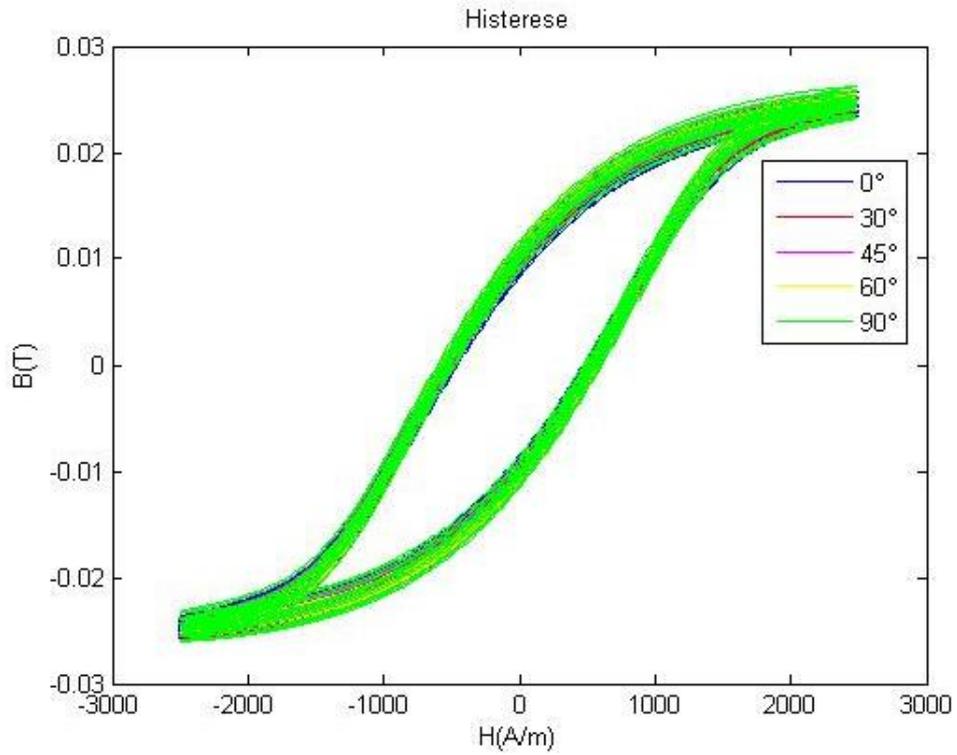
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 28 - Sobreposição dos ciclos de histerese para cinco diferentes orientações. Carga 0,6 ton.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 29 - Sobreposição dos ciclos de histerese para cinco diferentes orientações. Carga 0,7 ton.



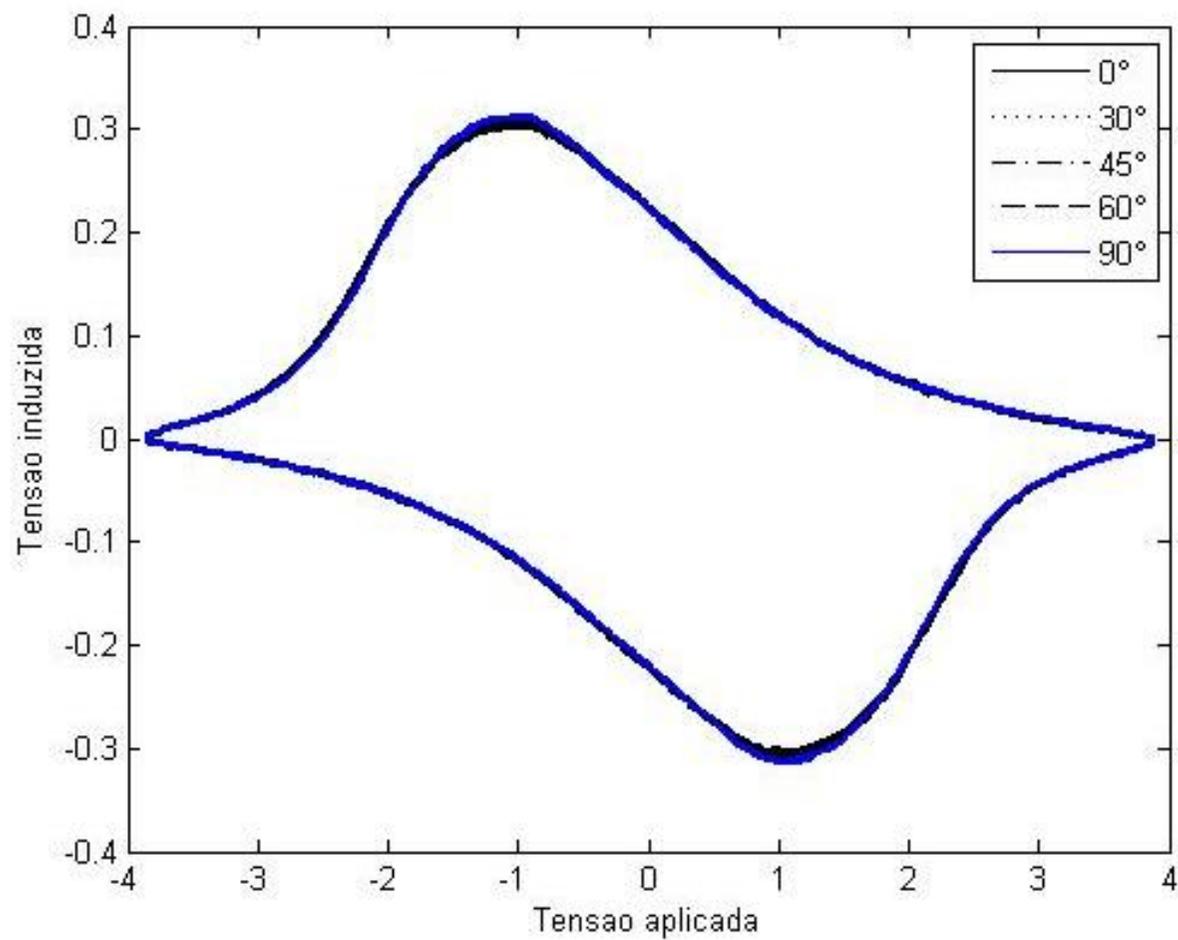
Fonte: Elaborado pelo Autor.

6.1.3 Análise da Tensão Aplicada e Induzida.

Outro tipo de gráfico traçado a partir dos dados capturados são as curvas de tensão induzida no material com a tensão aplicada. Sendo a tensão induzida sensível ao estado de tensão do material e a sua microestrutura, essas curvas também permitem avaliar a orientação de mais fácil magnetização. Assim como na apresentação das curvas de histerese, cada figura de 30 a 33 é reservada a um carregamento e exibe cinco curvas sobrepostas de tensão induzida versus tensão aplicada, uma para cada orientação (0° , 30° , 45° , 60° , 90°).

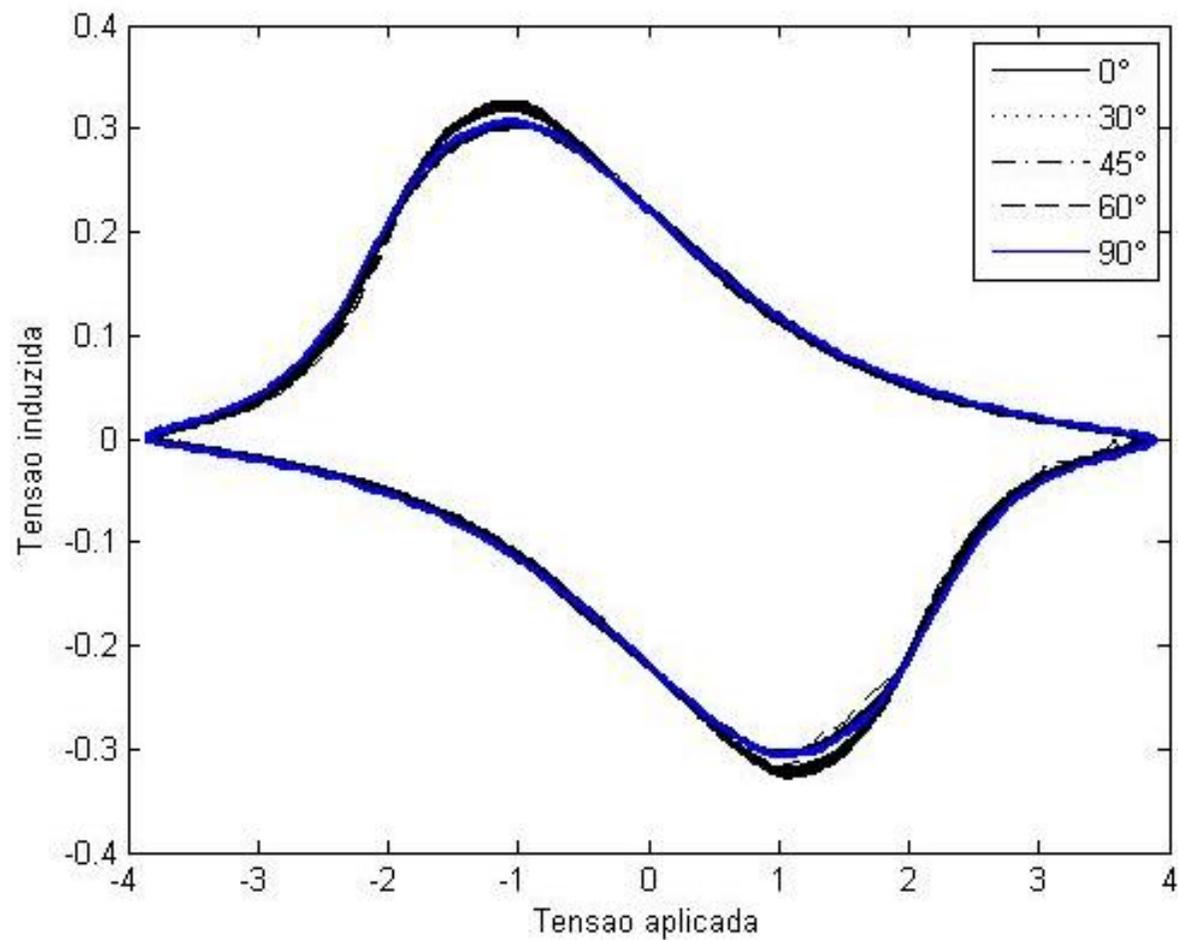
No conjunto de figuras de 30 a 33 percebe-se uma ligeira mudança nos valores de pico (valores máximo de tensão induzida e tensão aplicada) em virtude da orientação. Essa mudança fica mais evidente à medida que aumenta a carga.

Figura 30 - Sobreposição das curvas de tensão aplicada [Volt] versus tensão induzida [Volt] para diferentes orientações. Carga 0,0 ton.



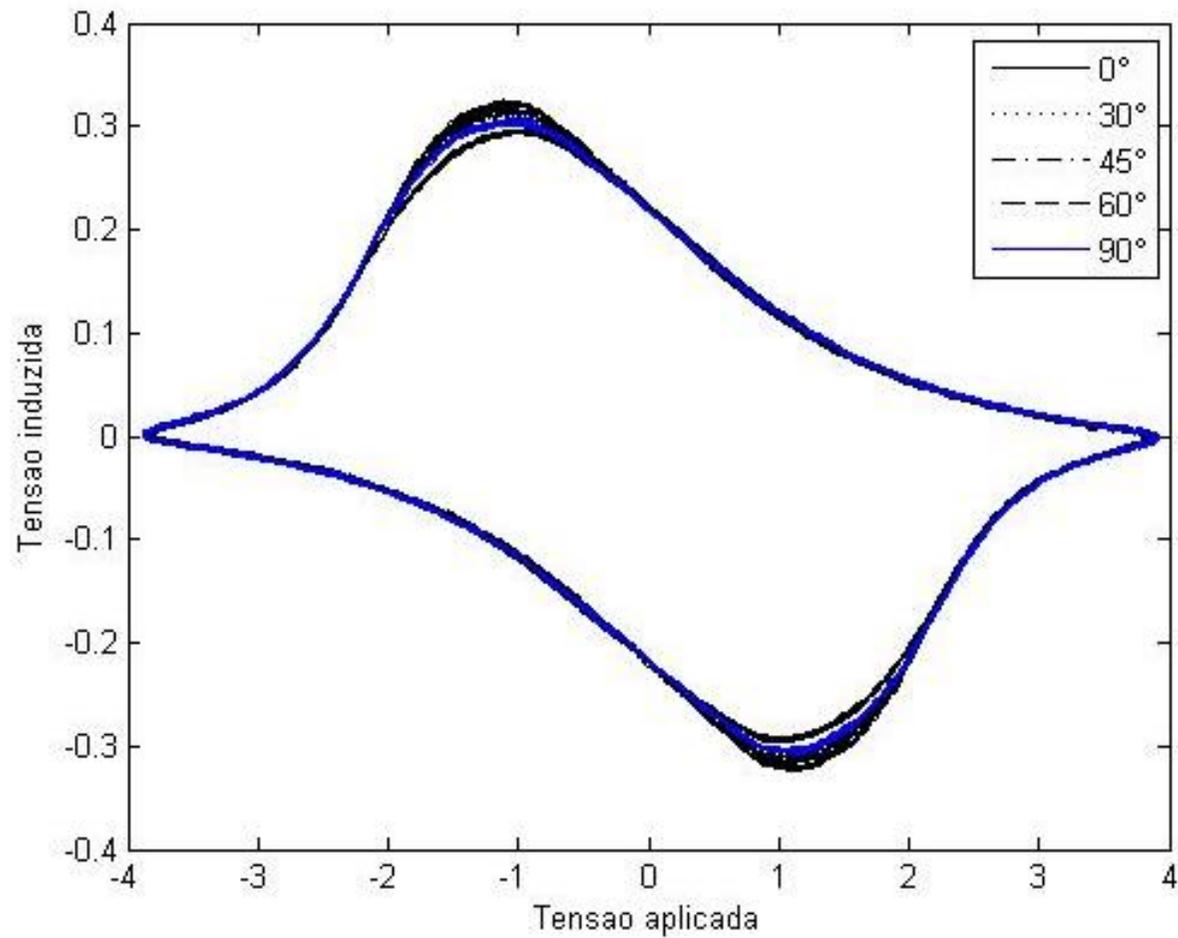
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 31 - Sobreposição das curvas de tensão aplicada [Volt] versus tensão induzida [Volt] para diferentes orientações. Carga 0,5 ton.



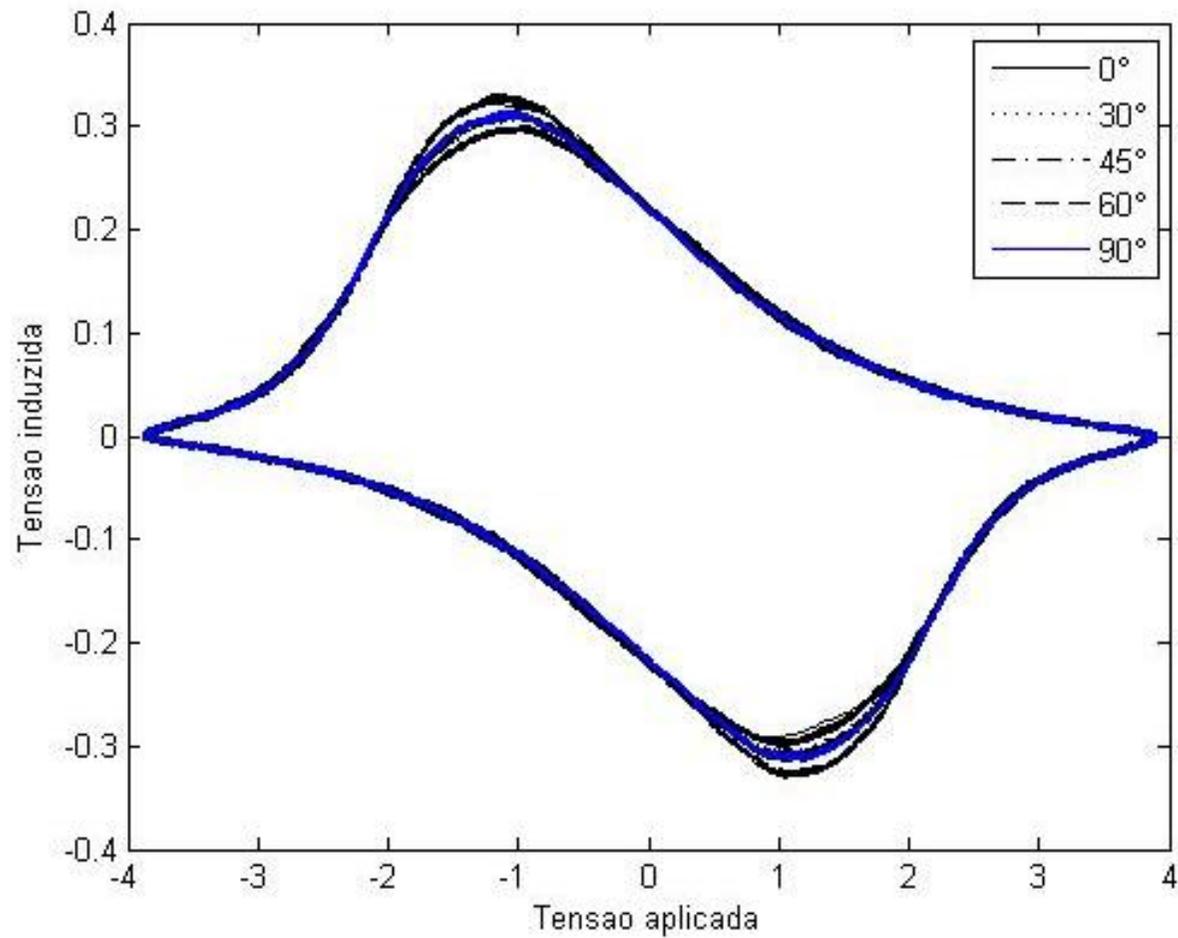
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 32 - Sobreposição das curvas de tensão aplicada [Volt] versus tensão induzida [Volt] para diferentes orientações. Carga 0,6 ton.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 33 - Sobreposição das curvas de tensão aplicada [Volt] versus tensão induzida [Volt] para diferentes orientações. Carga 0,7 ton.

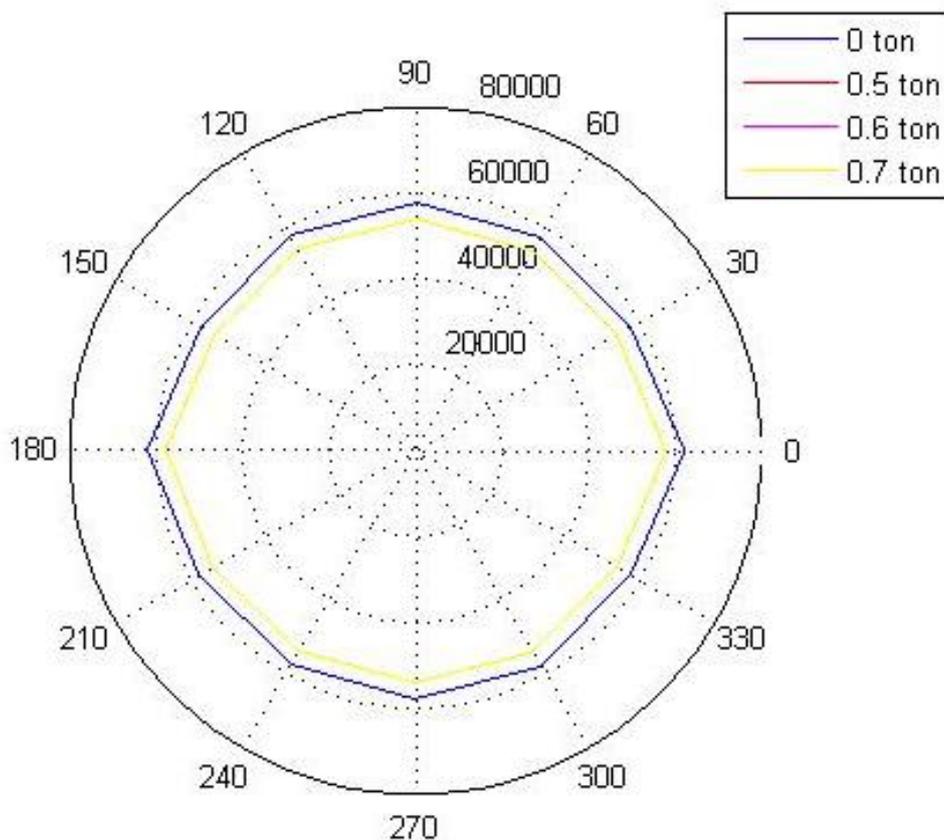


Fonte: Elaborado pelo Autor.

6.2 Ensaio Ultrassônicos.

Após sua captura, os sinais ultrassônicos foram processados por um algoritmo capaz de realizar a correlação cruzada de uma série temporal, como exposto anteriormente no item 4.2.1 - Processamento do Sinal. A correlação cruzada do sinal fornece o tempo entre a onda lateral e o eco de fundo, ou seja, o tempo de percurso sônico. Conhecido esse tempo de voo, a espessura do corpo de prova e a configuração dos transdutores (distância, ponto de saída do feixe e ângulo de incidência no aço) é possível determinar a velocidade de propagação da onda no corpo de prova com auxílio da equação 15. Daí foi produzido um gráfico da velocidade em função das orientações, para cada um dos diferentes carregamentos aplicado.

Figura 34 - Velocidade de propagação da onda ultrassônica em função da orientação, para diferentes carregamentos.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Como pode ser verificado no gráfico da figura 35, a velocidade ultrassônica modificou-se com o estado de tensões. A aplicação de carga na barra ocasionou uma redução na velocidade de propagação da onda em relação ao estado sem carregamento. Porém, não foi observada mudança na velocidade com o crescimento da carga aplicada. É possível ainda verificar uma diferença de velocidade em relação à direção de laminação. Essa mudança pode ser ocasionada pela textura cristalográfica do material nessa direção, ou pelo estado de tensões. Tal mudança é conhecida como Efeito Acustoelástico. (Bittencourt, 2003).

7 Conclusão.

Com base na literatura, as técnicas magnéticas são úteis na análise de tensões residuais. Entretanto, a partir dos resultados levantados nesse trabalho, não foi possível diferenciar, através de parâmetros magnéticos (μ_r , H, B) extraídos a partir de sinais de tensões aplicada e induzida em um corpo de prova submetido a diferentes níveis de carregamento aplicados durante um ensaio de flexão. A hipótese levantada é de que os efeitos das forças exercidas sobre os domínios magnéticos presentes na zona comprimida anulam a influência das forças trativas exercida sobre os domínios magnéticos presentes na zona tracionada.

A adoção de outra forma de apresentar os resultados magnéticos (gráfico da tensão induzida no material com a tensão aplicada) revelou uma ligeira mudança em relação à orientação, com maior tendência de separação com o aumento da carga.

O ensaio ultrassônico mostrou resultados mais satisfatórios na avaliação do estado de tensões pela mudança na velocidade de propagação da onda ultrassônica em relação ao estado sem carregamento e as demais cargas na direção de laminação.

8. Sugestões para trabalhos futuros.

Avaliação de tensões residuais com outras técnicas magnéticas, tais como: Ruído magnético de Barkhausen, Ruído magneto acústico.

Utilização de outros tipos de ondas ultrassônicas, tais como as ondas transversais.

Utilização de técnicas magnéticas e ultrassônicas para avaliação de tensões residuais em corpos de prova submetidos ao ensaio de tração.

9 Referências

- **ANDREUCCI, Ricardo.** Ensaio por ultra-som. Abende 2006;
- **BITTENCOURT, M.S.Q.** et al.. Medidas de tempo de percurso da onda ultrassônica para avaliação de tensões.In.: III Conferência pan americana de ensaios não destrutivos (PANNDT), Rio de Janeiro, 2003.
- **Bozorth R.M.,** Ferromagnetism (IEEE press, New York ,1951).
- **Buttle D.J ,Shaw B.,Moorthry V.,** Measurement good practice guide n.88 : Determination of residual stresses by magnetic methods ; National Physical Laboratory , 2006.
- **Callister. W.D .** Materials Science and Enginnering. An introduction. 7 ed. John Willey & Sons., Inc. 2007.
- **Chikazumi S.,** Physics of Magnetism (Wiley, New York, 1964).
- **Cullity B.D.,** Introducion to Magnetic Materials, 2nd edn. (Addison-Wesley, New York , 1972).
- **Dieter G. E.,** Mechanical Metallurgy (McGraw Hill, New York, 1961).
- **Jiles, D., C.,** Introduction to Magnetism and Magnetic Materials (Chapman and Hall, New York, 1991).
- **KOU, S.,** 2002, Welding metallurgy, 2nd Ed., JohnWiley & Sons.
- **LU, J.,** 1996. Handbook of Measurement of Residual Stress. Society of Experimental Mechanics.

- **MODENESI, Paulo J.**; Efeitos mecânicos. Belo Horizonte, 2001.
- **Papoulis, A., 1965**, “Probability, Random Variables and Stochastic Processes”, McGraw-Hill.
- **Praxedes, Thomas de Oliveira, 2012**, Sistema para a realização de ensaios não-destrutivos magnéticos e sua aplicação na avaliação da degradação microestrutural do aço A516 grau 60, Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil;
- **ROSENDO, T.,S.** “Análise Micromagnética de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento”, Tese, 2005.
- **Silva, C. C., 2006**, “Avaliação das Tensões Residuais de Soldagem em Tubulações de Pequeno Diâmetro Usadas em Refinaria de Petróleo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil;
- **Spaldin, N.A.** Magnetic materials, fundamentals and applications, 2ed. Cambridge press, (2011).
- **Stefania C-G., Atherton D.L., Clapham L.**, Plastic versus elastic deformation effects on magnetic Barkhausen noise in steel. Acta Mater. 48, 3545 (2000).