

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

Departamento de Metalurgia

ANÁLISE DE TENSÕES EM ARAMES DE RISERS FLEXÍVEIS PELO MÉTODO
MICROMAGNÉTICO DE RUÍDO BARKHAUSEN

Elisangela Pelizzari

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre
2010

Dedico esta dissertação a minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Orientador Telmo Roberto Strohaecker.

Ao Gend (Grupo de Ensaio Não Destrutivos) pelo apoio.

Aos amigos do Lamef (Laboratório de Metalurgia Física) por todos os momentos felizes.

Aos Professores da Engenharia Metalúrgica.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE EQUAÇÕES.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivos.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Tecnologia de Risers Flexíveis	2
2.1.1 Mecanismos de Falhas de Risers Flexíveis	3
2.1.2 Análise de Tensões em Risers.....	5
2.2 Tensões Residuais	5
2.3 Domínios Magnéticos.....	9
2.3.1 Curva de Histerese	10
2.3.2 Efeito Barkhausen.....	12
2.4 3MA	15
2.4.1 Generalidades	15
2.4.2 Análise do Ruído Barkhausen.....	18
2.4.3 Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial.....	20
2.4.4 Análise Incremental da Permeabilidade.....	21
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
3.1 Amostras analisadas	23

3.2	Método.....	25
3.3	Experimentos.....	26
4.0	RESULTADOS	28
4.1	Análise Harmônica do Campo Tangencial.....	28
4.2	Análise do Ruído Barkhausen.....	31
4.3	Análise da Permeabilidade Incremental.....	35
5.0	DISCUSSÃO.....	40
6.0	CONCLUSÕES.....	42
7.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
8.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Modelo da conexão de um Riser flexível.....	2
Figura 2.2	Configuração típica de um duto flexível.....	3
Figura 2.3	Armadura de um Riser aberto, com vista das camadas internas.....	5
Figura 0.1	Classificação das tensões residuais e sua ordem de grandeza.....	6
Figura 0.5	Diagrama esquemático indicando a tensão efetiva (TR + solicitações de serviço) observada em uma placa sob carregamento de flexão.....	8
Figura 2.6	Movimento das fronteiras de domínio para favorecer o alinhamento e crescimento dos domínios em função do campo magnético aplicado. (a) Ausência de campo magnético. (b) Presença de um fraco campo magnético. (c) Presença de um forte campo magnético ocasionando o alinhamento dos domínios.....	9
Figura 2.7	Estrutura de uma fronteira de domínio de 180°.....	10
Figura 2.8	Curva de magnetização característica de um material ferromagnético.....	10
Figura 2.9	Curva de histerese e o comportamento dos domínios magnéticos em cada estágio do ciclo.....	12
Figura 2.10	Representação da Curva de Histerese para um material ferromagnético.....	13
Figura 2.11	Sinal magnético Barkhausen obtido de uma amostra de aço ASTM A 515.....	14
Figura 2.12	Ilustração do efeito da tensão sobre a estrutura de domínios. (a) condição inicial: Domínios orientados aleatoriamente, sem nenhuma tensão aplicada. (b) mesma amostra de (a), exceto pela moderada tensão aplicada. (c) mesma amostra de (b), exceto pelo aumento da tensão aplicada.....	15
Figura 2.13	Relação de sinais medidos através da técnica micromagnética 3MA.....	16
Figura 2.14	Influência do estado de tensões residuais e da dureza na curva de Histerese e na amplitude do sinal Barkhausen.....	19
Figura 2.15	Distorção da indução magnética causada pela não-linearidade da curva de Histerese.....	20

Figura 2.16	Relação entre a forma da onda do campo magnético tangencial $H_t(t)$ e da indução magnética $B(t)$	20
Figura 2.17	Relação entre a curva de histerese e a variação incremental da permeabilidade magnética.....	22
Figura 3.1	Amostra onde foram realizados ensaios magnéticos.....	23
Figura 3.2	Metalografia da amostra analisada, microestrutura perlítica-ferrítica.....	24
Figura 3.3	Sensor magnético utilizado no ensaio, dimensões do sensor e da área de contato.....	25
Figura 3.4	Dispositivo projetado para a fixação do sensor na amostra.....	26
Figura 3.5	Montagem do ensaio mostrando o equipamento e o sensor magnetizando a amostra.....	27
Figura 4.1	Amplitude da terceira harmônica em função do carregamento.....	28
Figura 4.2	Amplitude da quinta harmônica em função do carregamento.....	29
Figura 4.3	Amplitude da sétima harmônica em função do carregamento.....	29
Figura 4.4	Distorção harmônica em função do carregamento.....	29
Figura 4.5	Ângulo de fase da terceira harmônica em função do carregamento.....	30
Figura 4.6	Ângulo de fase da quinta harmônica em função do carregamento.....	30
Figura 4.7	Ângulo de fase da sétima harmônica em função do carregamento.....	30
Figura 4.8	Coercividade derivada da análise harmônica em função do carregamento.....	31
Figura 4.9	Curva de calibração para Análise Harmônica.....	31
Figura 4.10	Coercividade derivada da ARB em função do carregamento.....	32
Figura 4.11	Amplitude máxima para um ciclo de magnetização em função do carregamento.....	32
Figura 4.12	Sinal médio da curva para um ciclo de magnetização em função do carregamento.....	33
Figura 4.13	Amplitude da curva de magnetização para $H=0$ em função do carregamento.....	33
Figura 4.14	Largura da curva de magnetização para 25% de $M_{máx}$ em função do carregamento.....	34
Figura 4.15	Largura da curva de magnetização para 50% de $M_{máx}$ em função do carregamento.....	34
Figura 4.16	Largura da curva de magnetização para 75% de $M_{máx}$ em função do carregamento.....	34
Figura 4.17	Curva de calibração para Análise do Ruído Barkhausen.....	35

Figura 4.18	Campo coercivo derivado da permeabilidade incremental em função do carregamento.....	36
Figura 4.19	Amplitude máxima da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização em função do carregamento.....	36
Figura 4.20	Sinal médio da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização em função do carregamento.....	37
Figura 4.21	Sinal medido da curva $\mu(H)$ para $H=0$ em função do carregamento.....	37
Figura 4.22	Largura da curva de magnetização para 25% de $\mu_{\text{máx}}$ em função do carregamento.....	38
Figura 4.23	Largura da curva de magnetização para 50% de $\mu_{\text{máx}}$ em função do carregamento.....	38
Figura 4.24	Largura da curva de magnetização para 75% de $\mu_{\text{máx}}$ em função do carregamento.....	39
Figura 4.25	Curva de calibração para Análise da Permeabilidade Incremental.....	39
Figura 5.1	Comparação de curvas de histereses com a amplitude dos sinais das harmônicas.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Descrição dos parâmetros de resposta dos métodos magnéticos do 3MA para as quatro técnicas: AHCT, ARB, AIP e ACP.....	17
Tabela 2.2 Profundidades típicas para o 3MA.....	18
Tabela 3.1 Composição química das amostras de arame da armadura de tração de Risers flexíveis.....	24
Tabela 3.2 Propriedades do material.....	25
Tabela 3.3 Valores de tensão e carga correspondentes ao percentual da tensão de escoamento do material no estado encruado.....	26

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	Profundidade de Pele.....	18
Equação 4.1	Equação para curva de calibração do método de Análise Harmônica.....	31
Equação 4.2	Equação para curva de calibração do método de Análise do Ruído Barkhausen.....	35
Equação 4.3	Equação para curva de calibração do método de Análise da Permeabilidade Incremental.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

σ_I	Tensões residuais de primeiro tipo ou macro tensões;
σ_{II}	Tensões residuais de segundo tipo ou micro tensões;
σ_{III}	Tensões residuais de terceiro tipo ou micro tensões;
A_X	Amplitude das harmônicas de x ordem
P_X	Ângulo de fase da harmônica de x ordem
H_{CO}	Campo coercivo, derivado da técnica AHCT
H_{RO}	Harmônica mais elevada de $H_t(0)$
K	Distorção Harmônica
$\sum AH$	Somatório das Amplitudes das Harmônicas
V_{mag}	Amplitude da voltagem de saída para a análise Micromagnética
AHCT	Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial
M_{max}	Amplitude máxima da curva $M(H)$ para um ciclo de magnetização
$M_{médio}$	Sinal médio da curva $M(H)$ para um ciclo de magnetização
M_r	Sinal medido da curva $M(H)$ para $H = 0$ A/cm
H_{CM}	Campo coercivo, derivado de ARB
DH_{yyM}	Expansão da curva $M(H)$ para $M = 0,yy\%$ de M_{max}
ARB	Análise do Ruído Magnético Barkhausen
μ_{max}	Amplitude máxima da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização
$\mu_{médio}$	Sinal médio da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização
μ_r	Sinal medido da curva $\mu(H)$ para $H=0$ A/cm
$H_{C\mu}$	Campo coercivo, derivado da PI
$DH_{yy\mu}$	Expansão da curva $\mu(H)$ para $\mu=0,yy$ $M_{máx}$
AIP	Análise Incremental da Permeabilidade Magnética
Re	Parte real do sinal de corrente parasita para a frequência de N
Im	Parte imaginária do sinal de corrente parasita para a frequência de N
Mag	Magnitude do sinal de corrente parasita para a frequência de N
Ph	Ângulo de fase do sinal de corrente parasita para a frequência de N

RESUMO

A necessidade de análise das tensões em componentes de Risers Flexíveis para a manutenção preventiva e preditiva leva ao desenvolvimento de novas técnicas. O método micromagnético de Análise do Ruído Barkhausen se torna uma alternativa interessante para as análises. Neste trabalho os arames de Risers Flexíveis de seis polegadas (152,4 mm) que são de aço ABNT1060 foram ensaiados através do carregamento de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90% da tensão de escoamento, em cada carregamento foram feitas análises com o equipamento 3MA -II ("Multi-Parameter, Micro-magnetic, Microstructure and Stress Analyzer"). Para validação dos resultados da Análise do Ruído Barkhausen foram feitas análises com as técnicas magnéticas de Análise das Harmônicas do Campo Magnético Tangencial e de Análise da Permeabilidade Incremental. Os resultados foram satisfatórios e coerentes, tanto a comparação dos métodos de análise como a avaliação dos parâmetros das análises.

Palavras-chave: Ruído Barkhausen, Técnicas Micromagnéticas, Risers Flexíveis

ABSTRACT

The need for analysis of stresses in wire Flexible Risers for predictive and preventive maintenance leads to the development of new techniques. The method of micromagnetic Barkhausen Noise Analysis becomes an interesting alternative for analysis. In this work the wires of Flexible Risers that are six inches of steel ABNT1060 were tested by loading of 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90% of yield stress in each load were analysis done with the equipment 3MA. To validate the results of Barkhausen Noise Analysis were analyzed with the techniques of magnetic Harmonic Analysis of Magnetic Field Tangential and Analysis of Incremental Permeability. The results were satisfactory and consistent, both the comparison of analytical methods for evaluation of the parameters of analysis.

Key words: Barkhausen Noise, Micromagnetic Techniques, Flexible Risers

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Na indústria petroleira as falhas de equipamentos geram prejuízos inestimáveis devido a perdas mecânicas, humanas, problemas ambientais e paradas não programadas. Devido a problemas neste sentido, os investimentos em manutenções preventivas e preditivas aumentam, quanto menos invasiva for a técnica utilizada para analisar e avaliar as condições dos equipamentos maior será sua importância.

Este trabalho visa analisar a possibilidade de medidas de tensões em Risers flexíveis através da técnica de Ruído Barkhausen, complementando as análises feitas e apresentadas na tese de doutorado de Carlos Martins[1].

1.2 Motivação

A ruptura de arames de Risers flexíveis causa inúmeros problemas se não ocorrer a detecção antecipada do problema. Nesse sentido busca-se soluções na área de ensaios não-destrutivos, o Ruído Barkhausen aparece como alternativa para estas análises não invasivas.

1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram:

- Revisar o método de medição de tensões residuais por ruído Barkhausen;
- Avaliar diferentes formas de correlacionar tensões residuais com o comportamento magnético de materiais ferromagnéticos;
- Utilizar técnicas magnéticas comparativas para analisar a confiabilidade do método, como Permeabilidade Magnética e Análise Harmônica.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tecnologia de Risers Flexíveis

As plataformas e navios de produção "Off shore" são ligados aos poços petrolíferos através de dutos rígidos ou flexíveis, como a Figura 2.1. A experiência da Petrobras utilizando tubos flexíveis para extração e transporte de petróleo iniciou no ano de 1979, desde então, tais aplicações vêm crescendo constantemente, acompanhando os avanços em tecnologias de águas profundas[1].



Figura 2.1 Sistemas produção de petróleo “Off Shore” (da esquerda para a direita tem-se: Plataforma fixa, Navio de produção FPSO e Plataforma semi-submersível [2].

Apesar do custo (superior aos componentes rígidos) os tubos flexíveis são estruturas compostas que oferecem alta resistência aos carregamentos assimétricos, tais como tração, torção e pressão e possuem também uma baixa resistência ao dobramento. Este desempenho é alcançado através da utilização de tubos poliméricos complacentes (para o isolamento dos elementos) e camadas helicoidais de aço (para garantir resistência mecânica à estrutura) [1].

Os dutos flexíveis são estruturas multicamadas, como mostra a Figura 2.2 [3]. De maneira geral, estes são classificados, segundo a natureza da aplicação, em: "Flowline" (Utilizados em aplicações estáticas) e Risers (os quais são utilizados em aplicações dinâmicas). Além desta

classificação, os Risers podem ser divididos em: Risers "Bonded" (Com adesivo entre as camadas, com a função de reforçar a matriz polimérica) e Risers "Unbonded" (sem adesivo entre as camadas) [4].



Figura 2.2 Configuração típica de um duto flexível.[5]

2.1.1 Mecanismos de Falhas de Risers Flexíveis

Através de um sistema de bombas e injeção, é possível extrair o petróleo dos poços e transportá-lo até a plataforma ou navio. No entanto, não é apenas petróleo o produto extraído, mas também gases residuais e outros compostos corrosivos que atacam os dutos e o sistema de bombeamento.

A Norma N-2409 [4] cita vários modos de falha, os quais são definidos como eventos que levam o duto a não atuar como especificado.

Camadas Estruturais Metálicas

- Ruptura de tiras da camada estrutural causada por tensão, pressão interna, compressão radial, torção, curvatura ou combinação desses tipos de carregamento;
- Ruptura por fadiga do material constituinte da camada estrutural;
- Deformação excessiva permanente ou temporal da camada causada por cargas excessivas;
- Colapso da carcaça ou da armadura de pressão causado por pressão externa aplicada em camadas poliméricas mais leves que a água;

- Colapso da carcaça ou da armadura de pressão causado por aperto da armadura de tração, associado ou não com qualquer outra carga radialmente compressiva atuando no tubo simultaneamente;
- Formação de "gaiola de passarinho" (birdcaging) da armadura de tração causada por fricção entre duas camadas estruturais;
- Desgaste excessivo causado por fricção entre duas camadas estruturais;
- Perda de acoplamento entre estruturas, causado por dobramento excessivo, torção excessiva ou compressão axial durante os processos de instalação ou operação;
- Corrosão excessiva, degradação química e/ou biológica, ou abrasão de qualquer camada estrutural causada por fenômeno galvânico, fluidos agressivos ou abrasivos ou pelo contato do meio ambiente com a camada estrutural.[1]

Para as condições de operação dos Risers no Brasil, sujeitos a pressões internas relativamente baixas, mas expostos a altos níveis de tração, a falha da armadura de tração na conexão tem sido apontado como o principal modo de falha a ser investigado.

É importante considerar que a ruptura das camadas protetoras permite a passagem de soluções corrosivas (gases e água do mar) para o interior do duto, acelerando o processo de degradação através da combinação de fatores associados à fadiga e a corrosão. A Figura 2.3 apresenta a ruptura da camada protetora externa de uma seção de Riser flexível. Para esse processo diz-se que o anular foi alagado, onde o contato entre a água do mar e a armadura de tração resulta em um processo acelerado de degradação, associando os esforços trativos aos efeitos da corrosão. Outro fator refere-se ao fato de que nem todo o comprimento do Riser está sujeito a esforços excessivos, tanto dinâmicos quanto estáticos, suficientes para levar o componente à falha. Em geral, os pontos de conexão, de curvaturas acentuadas e de contato são os que sofrem as condições mais severas [1].

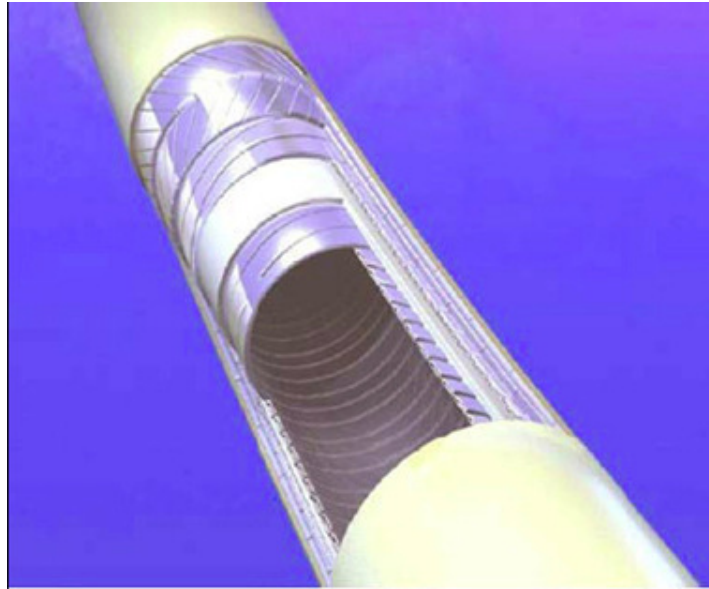


Figura 2.3 Armadura de um Riser aberto, com vista das camadas internas.

2.1.2 Análise de Tensões em Risers Flexíveis

Na conexão os arames estão sujeitos a tensões da ordem de 30 a 50% do limite de escoamento do material. Geralmente estes arames sofrem um processo de fadiga, causando a ruptura progressiva na região. A partir de um valor crítico de arames rompidos, os efeitos de torção tornam-se mais pronunciados, acentuando a agressividade do dano, levando o componente a falhar [1].

2.2 Tensões Residuais

O sistema de tensões presentes em um material ou componente estrutural na ausência de um carregamento externo ou de gradientes de temperatura é chamado de tensões residuais, sendo o limite de escoamento o valor máximo alcançado pelas tensões residuais. Caso as tensões residuais estejam além do limite de escoamento em algum pequeno elemento de volume do material, este elemento se deformará plasticamente, até que as tensões locais estejam reduzidas à tensão de escoamento [18].

As tensões residuais são causadas por deformações elasto-plásticas heterogêneas, ou seja, deformações distribuídas não uniformemente ao longo do volume do material, As deformações elásticas heterogêneas podem ser causadas por transformações de fase, por

contração ou expansão anisotrópica. As deformações plásticas heterogêneas podem ser induzidas em um material por gradientes de temperatura, produzidos por processos

De fabricação como soldagem e sinterização, por tratamentos térmicos, por processos de conformação mecânica, usinagem e corte, pela presença de concentradores de tensões.

O estado de tensões residuais em um material é o resultado da superposição de três tipos de tensões, conforme Figura 2.4:

a – Tensões residuais de primeiro tipo ou macro tensões [σ_I] – são tensões de longo alcance, distribuídas sobre um volume de vários grãos.

b – Tensões residuais de segundo tipo ou micro tensões [σ_{II}] – são tensões de curto alcance, variando no interior de um grão ou partícula de segunda fase, originárias de interações elásticas / plásticas entre grãos ou fases.

c – Tensões residuais de terceiro tipo ou micro tensões [σ_{III}] – são tensões sub-microscópicas originárias de imperfeições na rede, que possuem um alcance menor do que poucas distâncias atômicas.

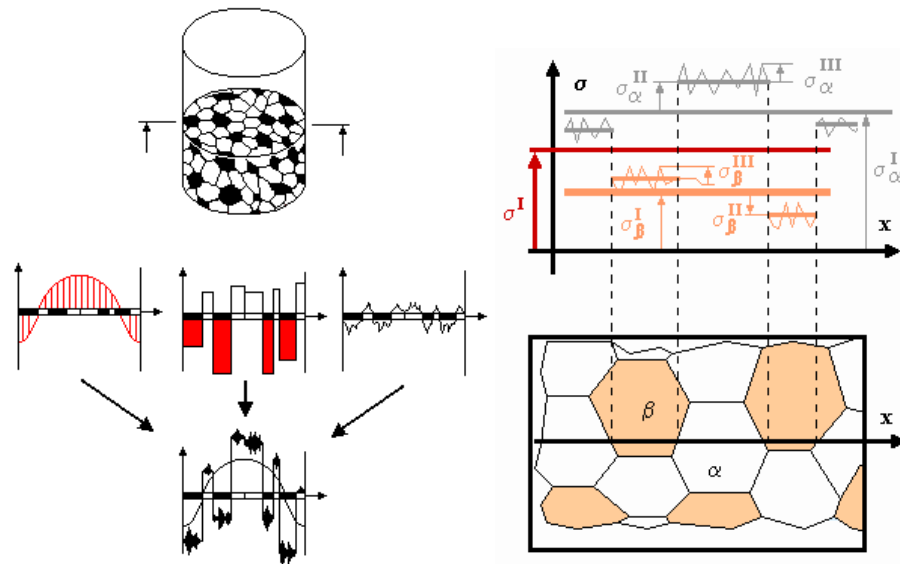


Figura 0.2 Classificação das tensões residuais e sua ordem de grandeza [18].

A maior parte dos tratamentos térmicos, mecânicos e químicos a que se submetem os materiais geram tensões residuais do primeiro tipo. Processos de fabricação como usinagem, brasagem, soldagem, fundição, conformação mecânica, tratamentos térmicos e recobrimentos normalmente induzem o aparecimento de tensões residuais de longo alcance. Tensões residuais de segundo tipo são encontradas em ligas multifásicas ou em materiais compostos onde as diferenças entre as propriedades térmicas e elásticas dos constituintes ocasionam deformações heterogêneas. Tensões residuais de terceiro tipo normalmente acompanham as

tensões residuais de primeiro e segundo tipos, visto que a deformação plástica, transformação de fase ou recristalização mudam a densidade e o arranjo dos defeitos da rede [18].

Efeito das Tensões Residuais

As tensões residuais presentes em um material ou componente estrutural exercem uma grande influência no seu comportamento durante o serviço, dependendo de sua natureza, valor e orientação com relação às tensões de trabalho atuantes. Estas tensões podem exercer efeitos favoráveis ou não, dependendo das condições de trabalho do componente analisado. Os principais efeitos desfavoráveis são os seguintes:

- a) A nucleação e crescimento de trincas quando o material é exposto a ambientes agressivos, tais como a atmosfera existente em regiões industriais, em ambiente marinho ou outros meios onde o material poderá ser empregado, no fenômeno conhecido como corrosão sob tensão;
- b) A nucleação e o crescimento de trincas quando o material é aquecido, envelhecido ou usinado;
- c) O empenamento do componente devido à redistribuição das tensões residuais presentes com a retirada de material em operações de usinagem ou corte;
- d) Instabilidade dimensional;
- e) Diminuição da vida do material quando sujeito a carregamentos cíclicos, ou seja, aumento da probabilidade de ocorrência de falha por fadiga a um número de ciclos inferior ao esperado quando o estado de tensões residuais presente na superfície do material for de tração, dentre outros efeitos.

Como efeitos favoráveis relativos à presença de tensões residuais em um componente pode-se citar aqueles obtidos pela introdução de um padrão de tensões residuais de compressão na superfície do mesmo, resultando em:

- a) Aumento na resistência à fadiga do material
- b) Alívio das tensões residuais de tração presentes na superfície do material, que poderiam contribuir para a nucleação de trincas em processos de corrosão sob tensão.
- c) Melhoria no padrão de tensões residuais existente na superfície de materiais que tenham sido submetidos a operações de usinagem ou esmerilhamento.
- d) Redução dos efeitos prejudiciais de concentradores de tensão como entalhes, rasgos e descontinuidades superficiais, dentre outros efeitos.

Na avaliação da integridade estrutural de componentes, as tensões residuais do primeiro tipo são consideradas como tensões equivalentes a carregamento. As tensões residuais devem ser incorporadas ao critério de falha utilização de uma forma apropriada, isto é, levando-se em consideração os mecanismos de falha atuantes e a natureza das tensões residuais presentes. Tensões residuais do primeiro tipo são normalmente adicionadas algebricamente ao carregamento estático ou quase estático de forma a se calcular a tensão efetiva. Os efeitos das tensões residuais na resistência à fadiga do material são normalmente relacionados com a tensão média. Sendo a distribuição das tensões residuais através do componente normalmente não uniforme, adota-se o conceito de resistência local estática ou dinâmica em muitas circunstâncias. Por exemplo, tensões de compressão nas vizinhanças de uma superfície submetida a um tratamento de jateamento de alto impacto com partículas metálicas (shot peening) aumentam a vida de fadiga do material e devem ser incorporadas no critério de falha. Tensões residuais do segundo tipo de vizinhanças de partículas de segunda fase ou reforços em materiais compostos afetam o comportamento de fadiga e de fluência do material. A tensão total local deve ser levada em consideração onde os mecanismos de falha operantes são sensíveis a danos localizados tais como em fadiga de alto ciclo ou trincas de corrosão sob tensão. Uma compreensão clara do papel das tensões residuais nos processos de falha ajuda na seleção de técnicas apropriadas de medida [1].

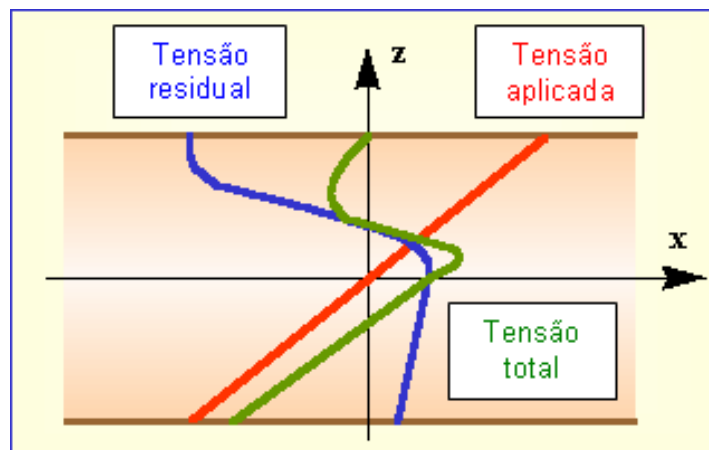


Figura 0.5 Diagrama esquemático indicando a tensão efetiva (TR + solicitações de serviço) observada em uma placa sob carregamento de flexão [18].

2.3 Domínios Magnéticos

A nível macroscópico, domínios magnéticos são pequenos volumes distribuídos ao longo dos materiais e são compostos por vários átomos que se encontram alinhados paralelamente. No estado desmagnetizado, sem a influência de tensões ou campos magnéticos externos, os domínios se encontram distribuídos de forma aleatória e a magnetização resultante do material é igual ou próxima a zero. Quando os domínios sofrem a influência de um campo magnético externo, Figura 2.6, os átomos de um dado volume sofrem uma rotação conjunta em volta de seu próprio eixo e se alinham na direção mais próxima à direção do campo magnético externo ocasionando mudanças apenas na direção de magnetização do volume.

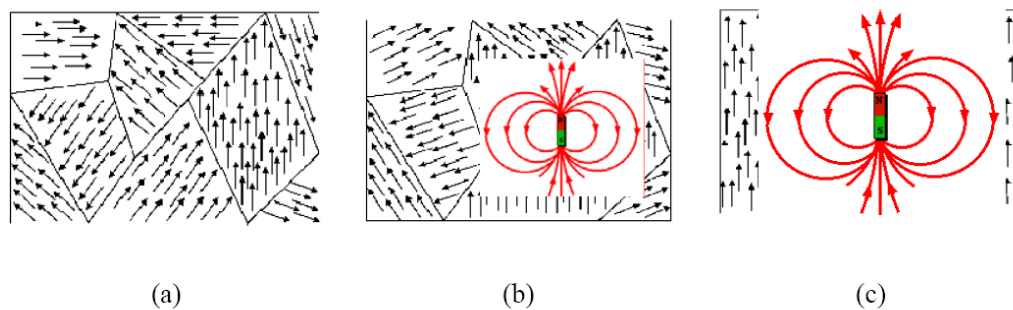


Figura 2.6 Movimento das fronteiras de domínio para favorecer o alinhamento e crescimento dos domínios em função do campo magnético aplicado. (a) Ausência de campo magnético. (b) Presença de um fraco campo magnético. (c) Presença de um forte campo magnético ocasionando o alinhamento dos domínios.

As fronteiras dos domínios podem ser classificadas como fronteiras de 180° , nas quais os spins giram de 180° de um domínio para o domínio adjacente e fronteiras de 90° , nas quais os spins giram de 90° de um domínio para o domínio adjacente. A mudança de orientação do spins na fronteira se dá de forma suave e este fato pode ser observado esquematicamente na Figura 2.7, onde é apresentado a fronteira entre dois domínios com orientações defasadas de 180° . A largura da fronteira varia entre 102 a 103 Angstroms [CHIKAZUMI, 1966].

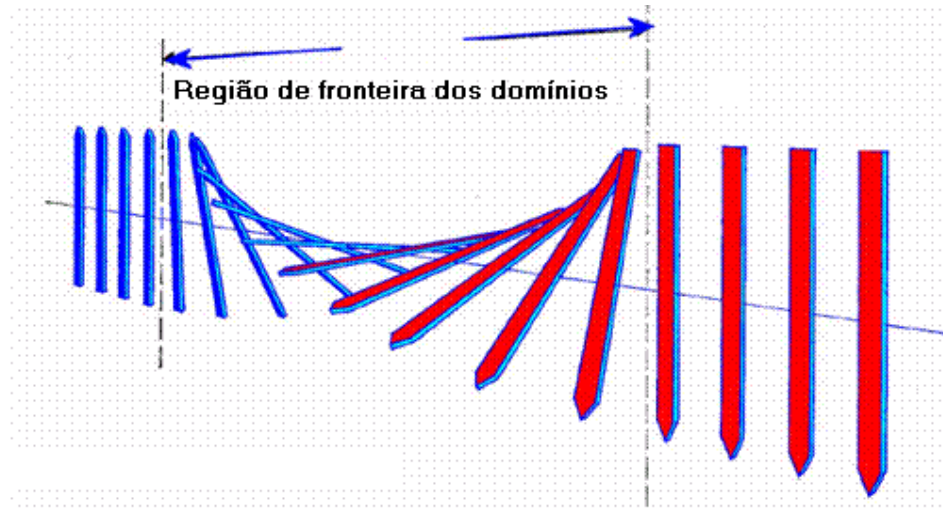


Figura 2.7 Estrutura de uma fronteira de domínio de 180°.

2.3.1 Curva de Histerese

A curva de magnetização característica de um material ferromagnético, indicada na Figura 2.8, é obtida plotando-se os valores da intensidade de magnetização M ou da indução magnética B em função da força magnetizadora H e pode ser utilizada para estudar o comportamento de um material ferromagnético sob a influência de um campo magnético externo aplicado. A curva de magnetização se divide em quatro regiões. Na primeira região ocorre a magnetização do material a qual é reversível com a retirada do campo magnético aplicado e é chamada de permeabilidade inicial onde o aumento crescente no valor do campo magnético aplicado ocasiona o deslocamento das fronteiras dos domínios a partir de suas posições iniciais.

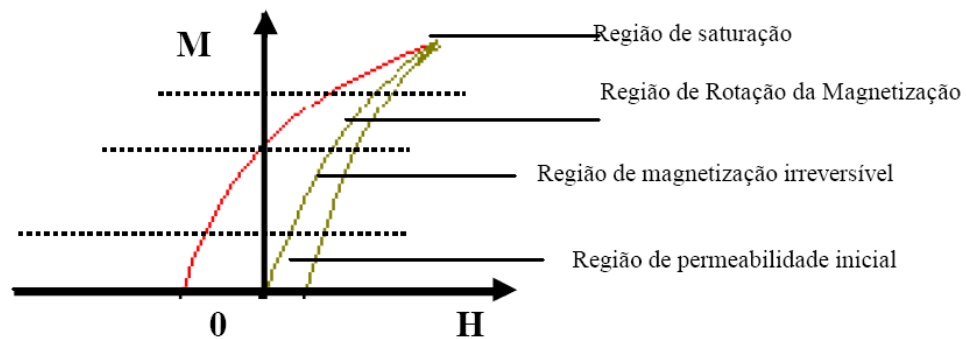


Figura 2.8 Curva de magnetização característica de um material ferromagnético

Na segunda região, chamada de magnetização irreversível, devido ao aumento da intensidade do campo magnético aplicado, ocorre o deslocamento das fronteiras dos domínios de forma irreversível e ocasiona no material um magnetismo residual. A presença de grandes quantidades de inclusões e precipitados nos materiais pode ocasionar nesta região a rotação irreversível do vetor de magnetização dos domínios. Nesta região o sinal Barkhausen pode ser detectado por que muitas das pequenas descontinuidades que ocorrem na magnetização são induzidas pelo deslocamento irreversível das fronteiras dos domínios e pela rotação irreversível da magnetização local dos domínios. O aumento do campo magnético a partir desta região conduz os domínios à região chamada região de rotação da magnetização e ocasiona mais uma vez a irreversibilidade dos domínios, pois, considera-se que o movimento das fronteiras já se completou e o aumento da magnetização é responsável apenas pela rotação dos domínios. Após esta região a magnetização atinge a magnetização de saturação do material [8].

Observa-se nas curvas de histerese utilizadas para representar o comportamento dos materiais ferromagnéticos que a curva de magnetização inicial não é retrçada quando os valores de campo sofrem uma diminuição ao atingirem a chamada região de magnetização irreversível. Este comportamento, representado na curva de histerese, é indicado pela linha tracejada da Figura 2.9 e deve-se principalmente à rotação irreversível da magnetização dos domínios e ao deslocamento irreversível das fronteiras dos domínios.

Na curva de magnetização representada na Figura 2.8 pela linha contínua, verifica-se que o aumento do campo magnético H ocasiona o aumento no valor da intensidade magnética M de zero até um máximo que ocorre na região de saturação do material. Ao se reduzir a intensidade do campo magnético aplicado, a curva percorre uma trajetória que passa pelo zero, sofre inversão e atinge novamente a região de saturação do material.

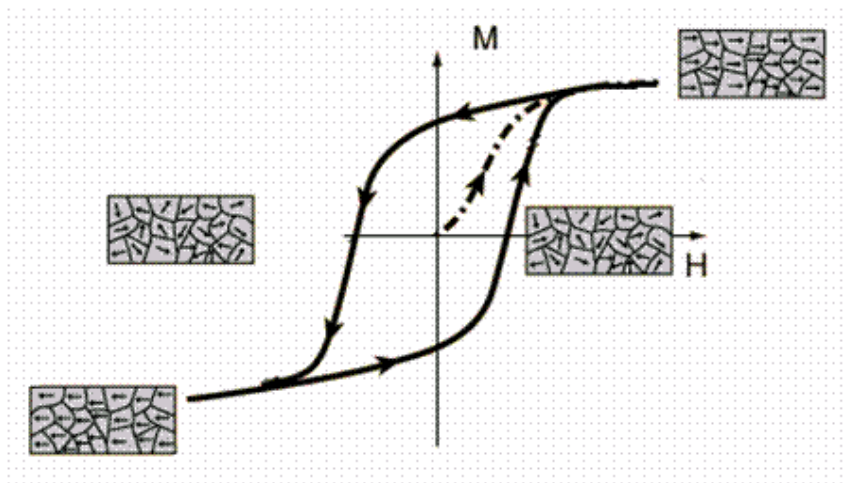


Figura 2.9 Curva de histerese e o comportamento dos domínios magnéticos em cada estágio do ciclo.

2.3.2 Efeito Barkhausen

Os domínios magnéticos constituem a microestrutura dos materiais ferromagnéticos e no estado desmagnetizado encontram-se com a direção dos vetores de magnetização aleatoriamente distribuídos. As fronteiras entre os domínios de diferentes magnetizações são constituídas pelas paredes dos domínios que apresentam uma distribuição suave nas suas direções de magnetização, conforme visto na Figura 2.10. Quando submetidos a um campo magnético externo, os vetores de magnetização dos domínios tendem a aumentar na direção do campo magnético aplicado causando a aniquilação das fronteiras entre os domínios. No estado de saturação, os vetores de magnetização têm a mesma direção e as paredes dos domínios tornam-se mais simples formando um único domínio, Figura 2.10(c). O movimento das fronteiras dos domínios é diretamente influenciado por diversas barreiras estruturais presentes no material. Entre estas barreiras podem-se citar inclusões, discordâncias, contorno de grãos e a presença de tensões internas ao material. À medida que os domínios magnéticos crescem sob a influência de um campo magnético externo, eles encontram estas barreiras que são vencidas com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado. O movimento dos domínios por estas barreiras ocorre em saltos e causa mudanças discretas na magnetização do material dando origem ao ruído magnético Barkhausen.

A interação entre domínios magnéticos e as barreiras estruturais presentes no material dá origem a dois tipos de sinais: acústico e magnético Barkhausen [9]. O sinal acústico origina-se das ondas elásticas emitidas pelo material quando subitamente as fronteiras de domínios se

libertam de uma barreira estrutural. O sinal magnético origina-se principalmente do movimento irreversível das fronteiras de 180° através das barreiras de energia quando um material ferromagnético é submetido a um campo magnético externo variável que percorre toda a sua curva de histerese [9].

A curva de histerese de uma amostra ferromagnética não é tão regular como aparenta, Figura 2.10, uma vez que os movimentos dos domínios pelas barreiras estruturais causam rápidas mudanças no fluxo magnético e este efeito pode ser detectado quando induzido em uma bobina sensora. Na região aumentada da curva, cada linha vertical nos degraus representa o movimento discreto de um conjunto de fronteiras e cada linha horizontal representa o tempo de espera antes que o próximo movimento ocorra [8].

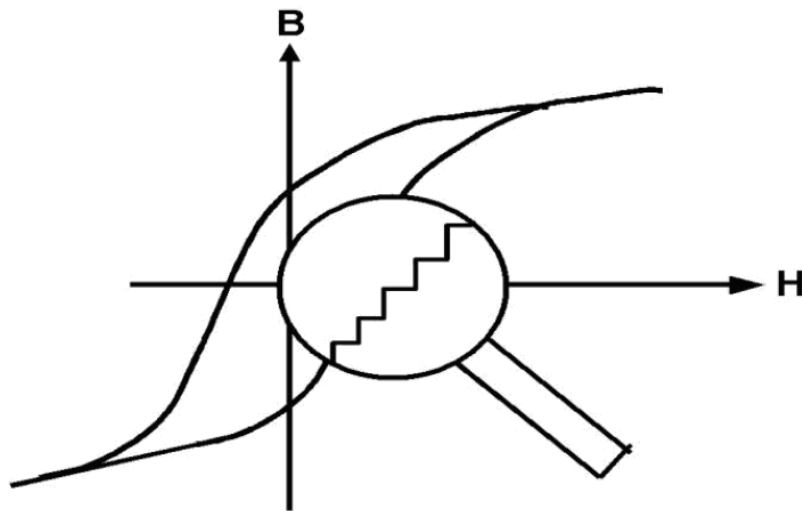


Figura 2.10 Representação da Curva de Histerese para um material ferromagnético.

O espectro de frequências apresentado pelo ruído magnético Barkhausen pode variar de alguns Hz até valores como 100 kHz [12] ou mesmo centenas de kHz [13]. O ruído magnético Barkhausen, representado no domínio tempo x amplitude é apresentado na Figura 2.11, onde podem ser observados a tensão de excitação aplicada a sonda, o campo magnético aplicado à amostra e o correspondente ruído magnético Barkhausen emitido. O valor máximo do ruído magnético Barkhausen ocorre quando a densidade de fluxo no material é zero, ou seja, no ponto de coercividade H_c .

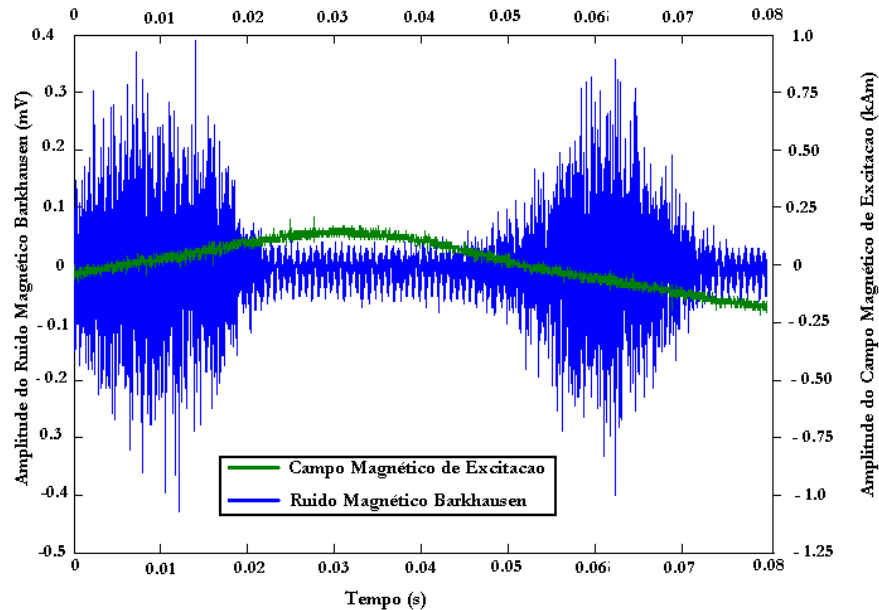


Figura 2.11 Sinal magnético Barkhausen obtido de uma amostra de aço ASTM A 515.

O que torna útil o uso do ruído magnético Barkhausen na caracterização, classificação e identificação de amostras de materiais ferromagnéticos é a sua sensibilidade quanto às variações nas propriedades mecânicas, variações microestruturais e estado de tensões presentes no material. Quando uma amostra de material ferromagnético é submetida a uma deformação elástica, as configurações dos domínios rearranjam-se energeticamente para uma configuração mais favorável. Na presença de um campo magnético externo e de tensões de tração, a amplitude do ruído magnético Barkhausen aumenta até atingir o limite elástico do material. Caso as tensões presentes sejam de compressão, o efeito é contrário, ou seja, a amplitude do ruído magnético Barkhausen diminui. Esta é a base para caracterização de tensões elásticas pelo método de análise do ruído magnético Barkhausen, sendo a interação entre a estrutura dos domínios e a presença de tensões no material indicada na Figura 2.12.

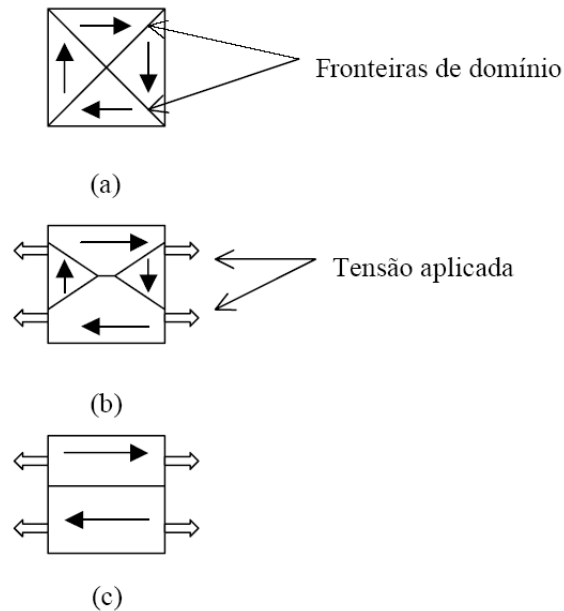


Figura 2.12 Ilustração do efeito da tensão sobre a estrutura de domínios. (a) condição inicial: Domínios orientados aleatoriamente, sem nenhuma tensão aplicada. (b) mesma amostra de (a), exceto pela moderada tensão aplicada. (c) mesma amostra de (b), exceto pelo aumento da tensão aplicada [14].

Na condição desmagnetizada e sem tensão aplicada da Figura 2.12 (a), o arranjo dos domínios magnéticos é tal que o resultado total da magnetização é zero. Esta condição é representada por 4 domínios separados e com ângulos de 90° .

Na Figura 2.12 (b) uma tensão moderada é aplicada a estrutura de domínio. Esta tensão aplicada ocasiona a diminuição dos domínios perpendiculares e o crescimento dos domínios paralelos à tensão aplicada. O aumento da tensão aplicada resulta na configuração do domínio da Figura 2.12 (c).

2.4 3MA

2.4.1 Generalidades

O método 3MA (Método Micromagnético Multi-Paramétrico para a Análise de Microestrutura e Estado de Tensões) baseia-se na interação entre o processo de magnetização e as propriedades mecânicas e microestruturais de materiais ferromagnéticos. Através da utilização de quatro técnicas de medidas micromagnéticas, este método não destrutivo

apresenta até 41 parâmetros de resposta, os quais são utilizados em combinação, a fim de determinar, de forma mais representativa, o estado de tensões ou microestrutural de diversos componentes. Combinando as técnicas de Análise do Ruído Barkhausen (ARB), Análise Incremental da Permeabilidade Magnética (AIP), Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial (AHCT) e Análise das Impedâncias das Correntes Parasitas (ACP) (Figura 2.13), o método permite separar os diversos fatores que influem no processo de crescimento dos domínios magnéticos, elevando assim, sua confiabilidade [15].

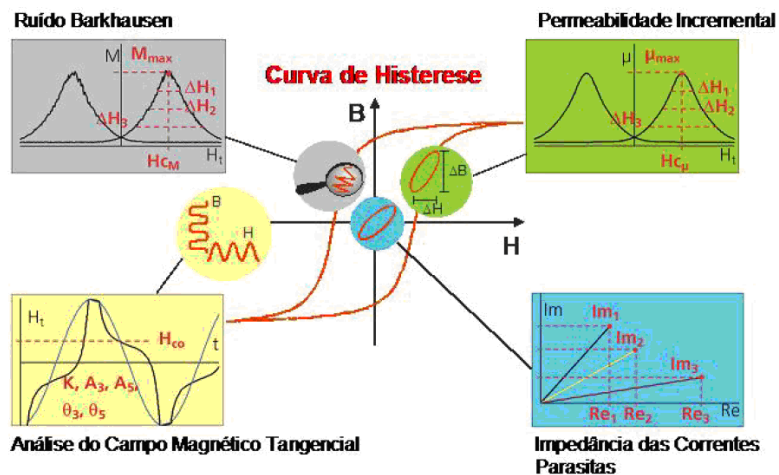


Figura 2.13 Relação de sinais medidos através da técnica micromagnética 3MA [15].

Tabela 2.1: Descrição dos parâmetros de resposta dos métodos magnéticos do 3MA para as quatro técnicas: AHCT, ARB, AIP e ACP. [15]

	Símbolo	Unidade	Descrição
AHCT	A_x	[A/cm]	Amplitude das harmônicas de x ordem
	P_x	[rad]	Ângulo de fase da harmônica de x ordem
	H_{CO}	[A/cm]	Campo coercivo, derivado da técnica AHCT
	H_{RO}	[A/cm]	Harmônica mais elevada de $H_t(0)$
	K	[%]	Distorção Harmônica, $K = 100\% * (\sum A_x^2)^{1/2}$
	SAH	[A/cm]	Somatório das Amplitudes das Harmônicas $SAH = \sum A_x$
	V_{mag}	[V]	Amplitude da voltagem de saída para a análise Micromagnética
	AHCT		Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial
ARB	M_{max}	[V]	Amplitude máxima da curva M(H) para um ciclo de magnetização
	$M_{médio}$	[V]	Sinal médio da curva M(H) para um ciclo de magnetização
	M_r	[V]	Sinal medido da curva M(H) para $H=0$ A/cm
	H_{CM}	[A/cm]	Campo coercivo, derivado de ARB
	DH_{yyM}	[A/cm]	Expansão da curva M(H) para $M=0,yy\%$ de M_{max}
	ARB		Análise do Ruído Magnético Barkhausen
AIP	μ_{max}	[V]	Amplitude máxima da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização
	$\mu_{médio}$	[V]	Sinal médio da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização
	μ_r	[V]	Sinal medido da curva $\mu(H)$ para $H=0$ A/cm
	$H_{C\mu}$	[A/cm]	Campo coercivo, derivado da PI
	$DH_{yy\mu}$	[A/cm]	Expansão da curva $\mu(H)$ para $\mu=0,yy$ M_{max}
	AIP		Análise Incremental da Permeabilidade Magnética
ACP	Re^*	[V]	Parte real do sinal de corrente parasita para a frequência de No
	Im^*	[V]	Parte imaginária do sinal de corrente parasita para a frequência de No
	Mag^*	[V]	Magnitude do sinal de corrente parasita para a frequência de No^*
	Ph^*	[rad]	Ângulo de fase do sinal de corrente parasita para a frequência de No^*
	ACP		Análise Multi-freqüência das Impedâncias das Correntes Parasitas

O método é rápido e simples de ser aplicado, onde os diferentes parâmetros são registrados quase que simultaneamente. Teoricamente, não exige contato direto entre o sensor e a peça, possibilitando até a inspeção de peças cobertas por camadas não ferromagnéticas ou que operem em altas temperaturas. Sua versatilidade está fundamentada na combinação de diferentes técnicas as quais apresentam maior sensibilidade há diversos parâmetros, tais como dureza, microestrutura, defeitos internos, tensões e tensões residuais. Outra vantagem é a faixa de profundidade alcançada, permitindo medidas mais superficiais, através da ARB, ou provenientes de camadas internas, através da AHCT, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Profundidades típicas para o 3MA. [15]

Técnica	Profundidades típicas
AHCT	0,2 - 10 mm
ARB	0,01 - 1 mm
ACP	0,01 - 0,5 mm
AIP	0,2 - 5 mm

A profundidade que um campo alternado penetra em um determinado material (δ) é governada pela frequência desse campo, pela condutividade e pela permeabilidade magnética do material (Equação 2.1).

Equação 2.1 Profundidade de Pele [1].

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

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

A seguir uma breve descrição das técnicas medidas pelo 3MA.

2.4.2 Análise do Ruído Barkhausen

A mais difundida das técnicas micromagnéticas, deriva da constatação de H. G. Barkhausen (1919) de que os movimentos das paredes de domínio magnético originam as discontinuidades na curva de histerese de um material ferromagnético. Barkhausen provou que estas discontinuidades podem induzir um ruído detectável na forma de um pulso de voltagem em uma bobina indutora posicionada na superfície do material, sendo este chamado de ruído ou Sinal Magnético Barkhausen.

A partir da aplicação de um campo magnético externo, pulsos de correntes parasitas são excitados nas proximidades dos eventos Barkhausen, as quais são recebidas pelo sensor

magnético indutivo, na forma de um ruído. A amplitude destas correntes parasitas é dependente da frequência e absorvida por dispersão.

A presença de tensões residuais compressivas no material produz um laço de histerese largo e baixos valores para a amplitude do sinal Barkhausen. Este efeito decorre da imposição ao crescimento dos domínios magnéticos efetuada pela presença das tensões. O efeito é inverso para as tensões residuais trativas atuando na direção de magnetização, apresentando este um laço de histerese estreito e altos níveis de amplitude para o sinal Barkhausen. Porém, percebe-se que o efeito é semelhante para materiais endurecidos, onde a densidade de discordâncias tem o mesmo efeito das tensões residuais compressivas no material, como mostra a Figura 2.14.

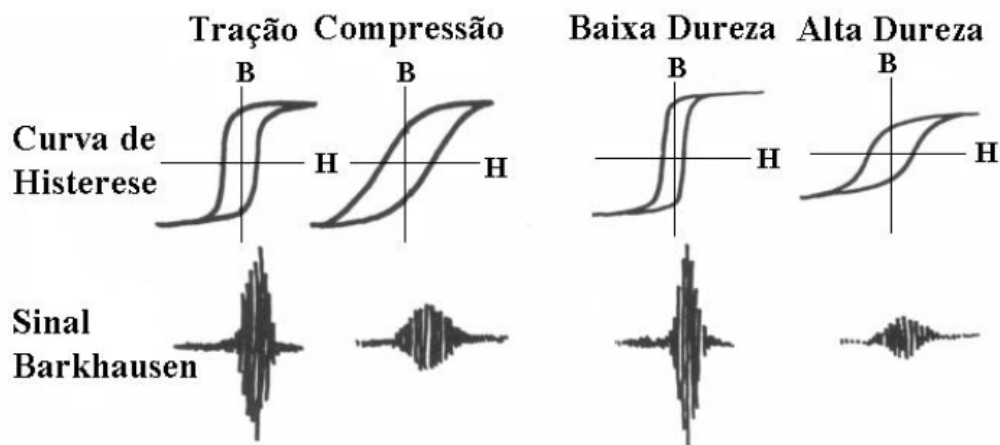


Figura 2.14 Influência do estado de tensões residuais e da dureza na curva de Histerese e na amplitude do sinal Barkhausen.

Desta forma, deve-se buscar a utilização de parâmetros adicionais de medida, capazes e separar os efeitos microestruturais da influência do estado de tensões presentes no material. Para tal, utilizam-se em conjunto com a medida do sinal $M_{\text{máx}}$ (amplitude máxima do ruído Barkhausen) as medidas de $M_{\text{médio}}$ (Valor médio da curva $M(H)$ para um dado período), M_r (O valor medido para $M(H)$ quando o campo é nulo) h_{cm} e as larguras do pico do ruído para 25%, 50% e 75% de $M_{\text{máx}}$ ($\Delta H_{25\%M}$, $\Delta H_{50\%M}$, $\Delta H_{75\%M}$) [15].

2.4.3 Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial

Devido à histerese magnética e a não linearidade da permeabilidade, a indução magnética, B , de um material ferromagnético sujeito a um campo magnético externo senoidal, H_t , não é senoidal, mas distorcida.

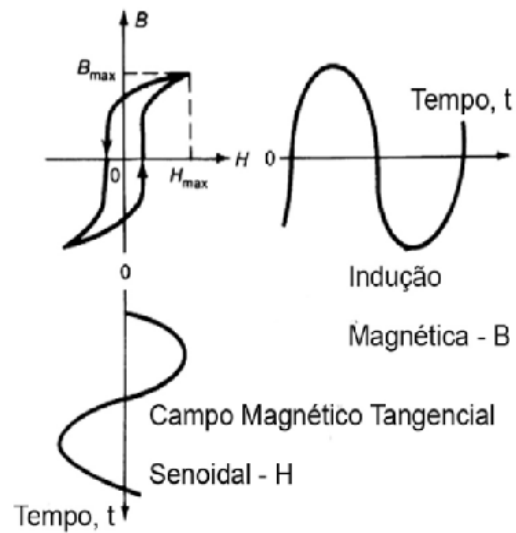


Figura 2.15 Distorção da indução magnética causada pela não-linearidade da curva de Histerese.

Esta onda distorcida da indução magnética contém as frequências harmônicas do campo magnética aplicado, como mostra a Figura 2.16.

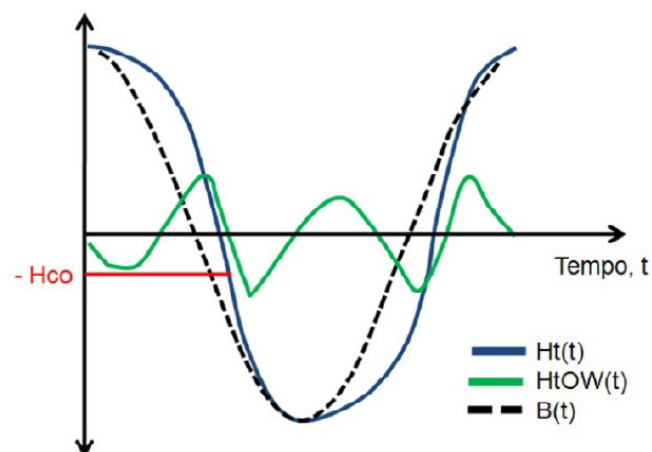


Figura 2.16 Relação entre a forma da onda do campo magnético tangencial $H_t(t)$ e da indução magnética $B(t)$.

Assim, a partir da aplicação de um campo magnético alternado, a quantidade harmônica da onda também é excitada com a frequência fundamental, dependendo da indutância total do eletromagneto, da frequência de magnetização e da forma do laço de histerese.

Durante este processo, devido à simetria do laço de histerese, apenas as harmônicas ímpares são exibidas. Amplitudes e fase da oscilação fundamental e das ondas harmônicas (A_i , P_i , com $i = 1, 3, 5, 7$ e 9) são determinadas pela Análise de Fourier de $H_i(t)$. Amplitudes e fase das 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, assim como o somatório das amplitudes até a 9ª harmônica (SAH), são usadas como respostas para esta técnica.

2.4.4 Análise Incremental da Permeabilidade

Na análise do Ruído Magnético Barkhausen apenas a porção irreversível da curva de magnetização é analisada. Entretanto, a porção reversível também carrega informações e esta pode ser analisada através da superposição do campo magnético externo (H) a um campo magnético incremental (ΔH). Este campo Incremental deve ser pequeno (em geral, $\Delta H < H_C/2$), mas de alta frequência (em geral, $f_{\Delta H} > 100 \cdot f_E$, afim de evitar a interferência causada pelos sinais reversíveis com frequência de magnetização). Através deste processo, pequenos ciclos de histerese são adicionados à curva de magnetização, permitindo a determinação da permeabilidade incremental (μ_{Δ}) como sendo a inclinação dos ciclos incrementais de histerese em função do campo magnético aplicado, como mostra a Figura 2.17.

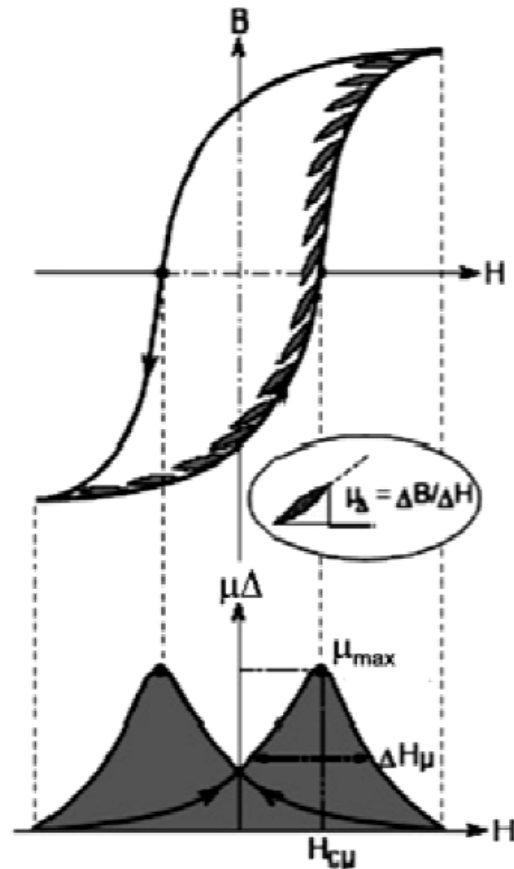


Figura 2.17 Relação entre a curva de histerese e a variação incremental da permeabilidade magnética.

Semelhante ao resultado obtido para a ARB, o máximo da curva de permeabilidade (μ_{\max}) coincide com a posição da coercitividade derivada desta técnica ($H_{C\mu}$). Outros parâmetros derivados desta técnica são: $\mu_{\text{médio}}$, a intensidade média do sinal, para um dado número de ciclos; μ_r , o valor da permeabilidade para $H = 0$; as expansões da curva para larguras de 25, 50 e 75% ($\Delta H_{25\mu}$, $\Delta H_{50\mu}$, $\Delta H_{75\mu}$, respectivamente).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Amostras analisadas

Neste trabalho foram avaliados arames que seriam utilizados na fabricação de Risers flexíveis de seis polegadas (152,4 mm). As amostras provêm da etapa anterior à montagem dos Risers, ou seja, não apresentam a deformação oriunda do ângulo de passo utilizado na montagem (o qual proporciona a configuração helicoidal à armadura de tração).

Os corpos de prova foram cortados contendo as seguintes dimensões: Espessura de 4mm; Largura de 9mm e Comprimento de 300mm, a amostra pode ser vista na Figura 3.1.



Figura 3.1 Amostra onde foram realizados ensaios magnéticos.

A Tabela 3.1 apresenta a composição química do aço utilizado. A análise química foi realizada em um espectrômetro de emissão óptica, conforme a Norma ASTM E1009. O material foi identificado como sendo um aço ABNT 1060. No estado original, os arames da

armadura de tração apresentam grau de encruamento da ordem de 60% (oriundo da etapa de laminação a frio do processo de manufatura deste componente).

Tabela 3.1 Composição química das amostras de arame da armadura de tração de Risers flexíveis.

Composição Química [% massa]							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Medida	0,61	0,24	0,84	0,018	0,011	0,04	<0,005
ABNT1060	0,55 - 0,65	*	0,6 - 0,9	0,03 Máx	0,05 Máx	*	*

As amostras não foram tratadas termicamente para reproduzir o estado real de utilização nos Risers flexíveis.

A Figura 3.2 apresenta a microestrutura apresentada do material utilizado no trabalho. A imagem revela a microestrutura perlítica – ferrítica com alto grau de encruamento.



Figura 3.2 Metalografia da amostra analisada, microestrutura perlítica-ferrítica.

As amostras foram preparadas seguindo a norma NBR13284 e atacadas com reagente químico Nital 2%, conforme norma NBR8108.

A Tabela 3.2 apresenta algumas propriedades do material.

Tabela 3.2 Propriedades do material.

Propriedades	σ_e	$\sigma_{m\acute{a}x}$	Dureza		C _{elétrica}	H _c
Unidade	[Mpa]	[Mpa]	[HV/0,2]	[HRC]	[1/ Ω *m]	[A/cm]
	892,4	1430,9	442	44	4,56E+06	-25,5

Os ensaios de dureza correspondem a média de quatro indentações realizadas na escala Vickers com carga de 200gf.

3.2 Métodos

Para a realização dos ensaios magnéticos foi utilizado um equipamento modelo 3MA-II desenvolvido pelo centro de pesquisa Fraunhofer Institut – IZFP da Alemanha.

Este equipamento proporciona a utilização de diferentes sensores com diferentes configurações, nesta análise o sensor magnético indicado contém uma área de contato de 4x2 mm².

A Figura 3.3 mostra o sensor utilizado, apresentando suas dimensões.

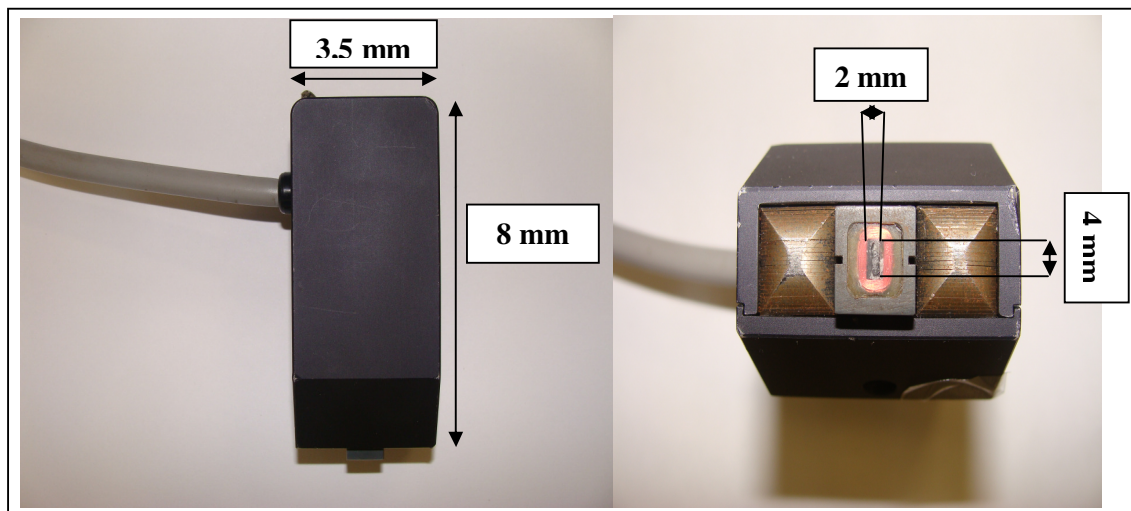


Figura 3.3 Sensor magnético utilizado no ensaio, dimensões do sensor e da área de contato.

3.1 Experimentos

Para a realização dos ensaios de magnetização foi projetado um dispositivo de fixação do sensor, necessário para não haver variabilidade nas medidas, a Figura 3.4 apresenta o dispositivo projetado.

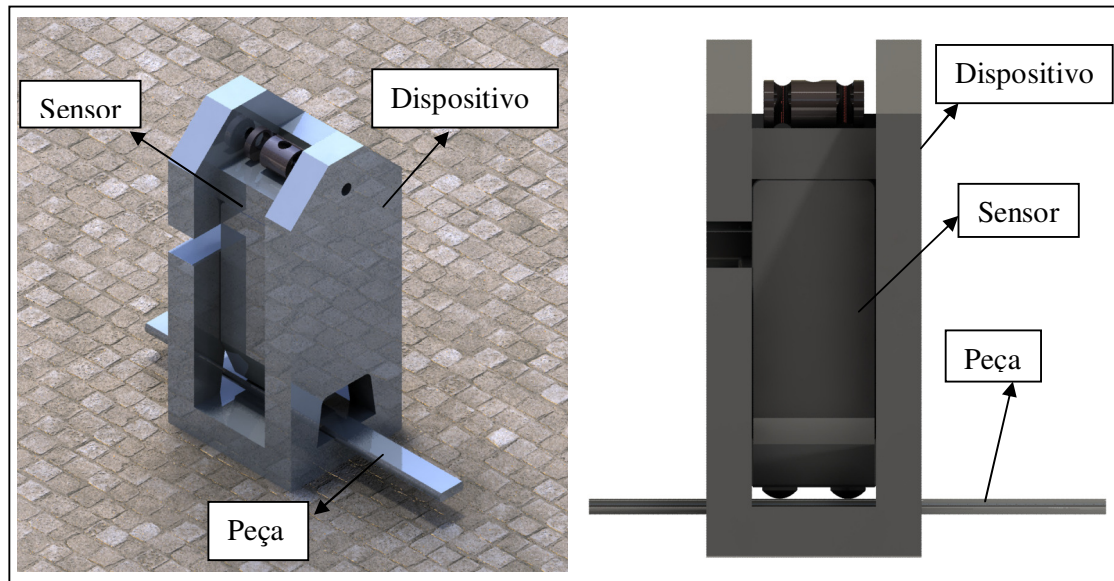


Figura 3.4 Dispositivo projetado para a fixação do sensor na amostra.

Foi realizado um ensaio de tração em uma amostra da armadura de tração de um Riser flexível, de aço ABNT 1060 no estado encruado. O ensaio foi conduzido a diferentes patamares de carregamento, definidos como o percentual da tensão de escoamento do material (no estado encruado apresenta $\sigma_e = 892.4$ MPa). Estes valores foram convertidos em carga (kN) e são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.3 Valores de tensão e carga correspondentes ao percentual da tensão de escoamento do material no estado encruado.

% σ_e	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
σ (MPa)	0	89,2	178,5	267,7	357,0	446,2	535,4	624,7	713,9	803,2
F (kN)	0	3,2	6,5	9,7	12,9	16,2	19,4	22,6	29,1	32,3

Foram realizadas 60 medidas para cada condição de carregamento. As configurações do equipamento utilizadas foram as seguintes:

Frequência de excitação = 100 Hz

$$H_{AHCT} = 45 \text{ A/cm (+ 0.5 A/cm)}$$

$$H_{ARB} = 45 \text{ A/cm (+ 1 A/cm)}$$

$$H_{API} = 35 \text{ A/cm (+ 0.5 A/cm)}$$

Onde H corresponde ao campo magnético aplicado para cada técnica em [A/cm].

Na Figura 3.5 é possível ver a disposição da amostra e do sensor no momento do ensaio.

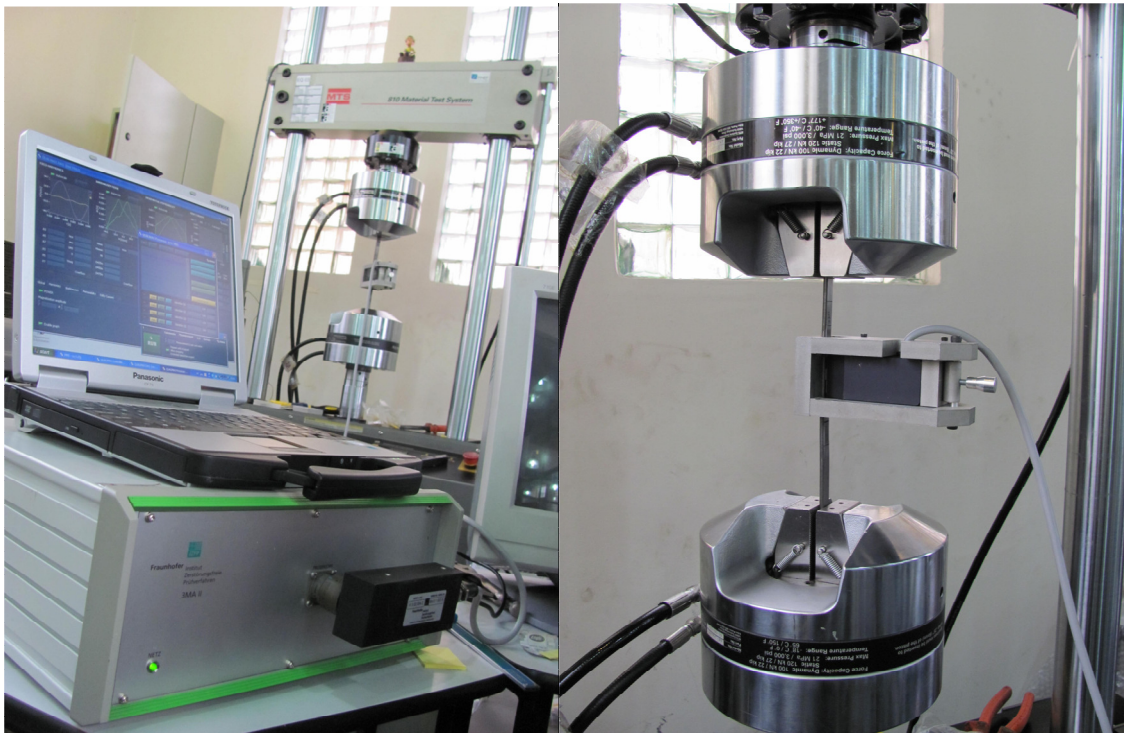


Figura 3.5 Montagem do ensaio mostrando o equipamento e o sensor magnetizando a amostra.

4.0 RESULTADOS

Foram analisados os resultados através de curvas dos parâmetros de cada técnica pelo carregamento. Para cada carregamento havia 60 medições onde foram feitas as médias e para melhor entendimento graficamente, estão representadas as curvas de mínimo e máximo.

4.1 Análise Harmônica do Campo Tangencial

A primeira técnica analisada é Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial (AHMT). As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam as curvas da terceira, da quinta e da sétima harmônica. Observa-se uma melhor proximidade no comportamento das linhas da terceira e sétima harmônicas, que possuem seqüência positiva, e uma maior sensibilidade na quinta harmônica, que possui seqüência negativa devido a vibração, perdas adicionais e aquecimento. Porém todas decrescem ao longo do carregamento.

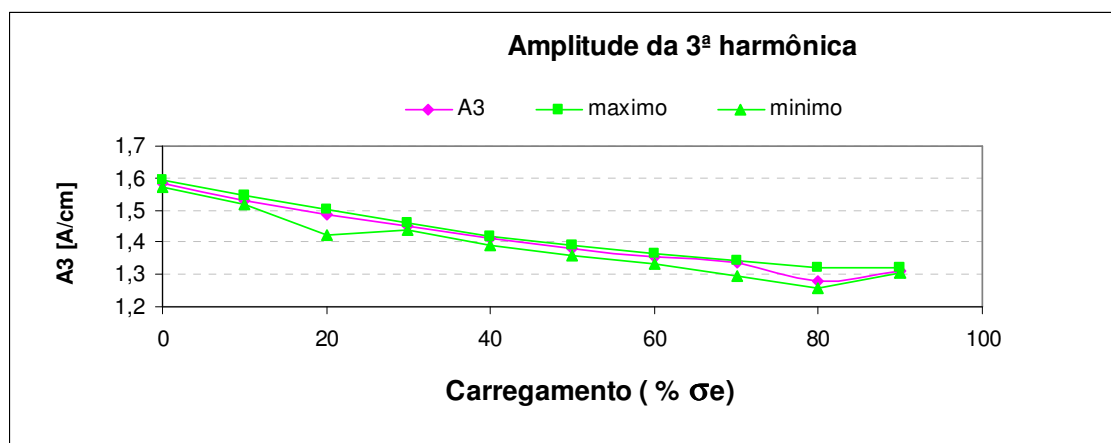


Figura 4.1 Amplitude da terceira harmônica em função do carregamento.

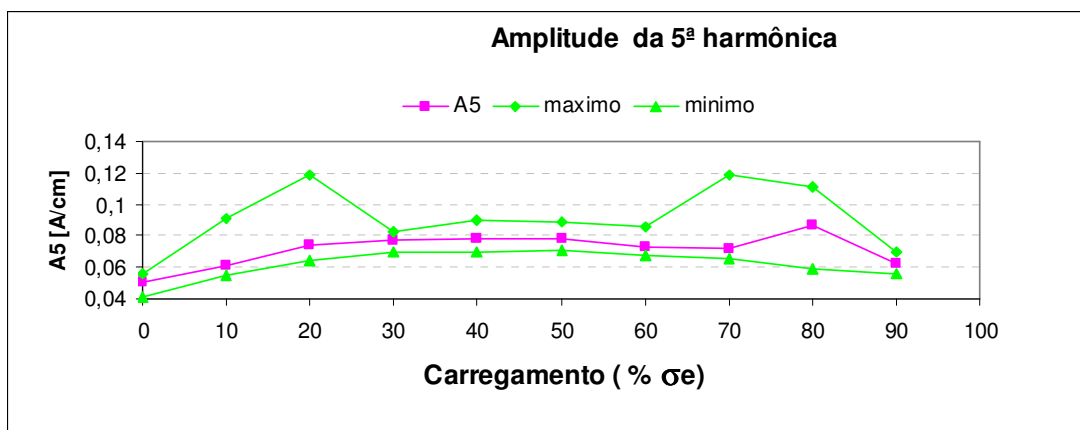


Figura 4.2 Amplitude da quinta harmônica em função do carregamento.

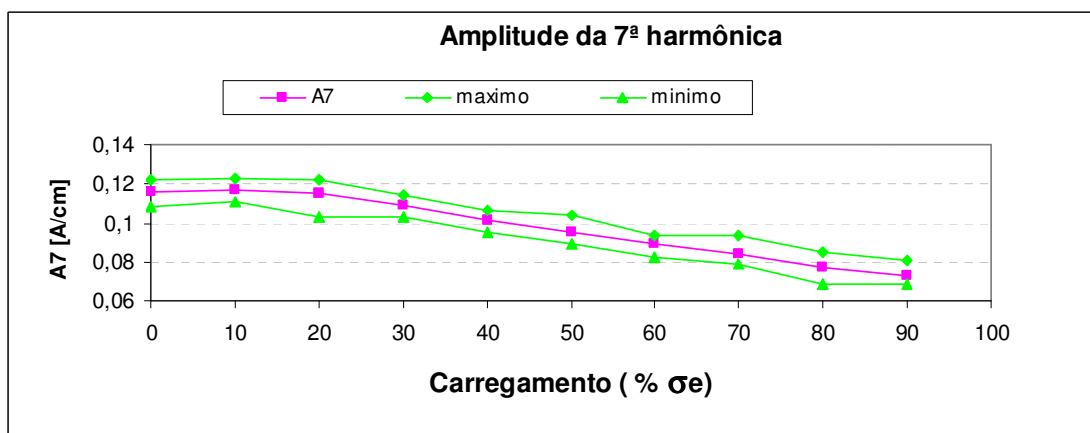


Figura 4.3 Amplitude da sétima harmônica em função do carregamento

A distorção harmônica [K] é representada na Figura 4.4,

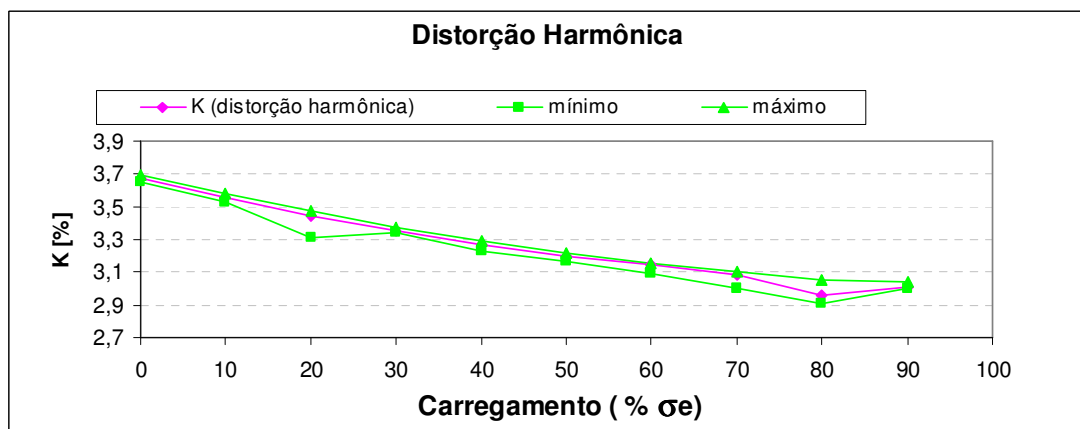


Figura 4.4 Distorção harmônica em função do carregamento

Os resultados dos ângulos de fase para a terceira, a quinta e a sétima harmônica estão representados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente.

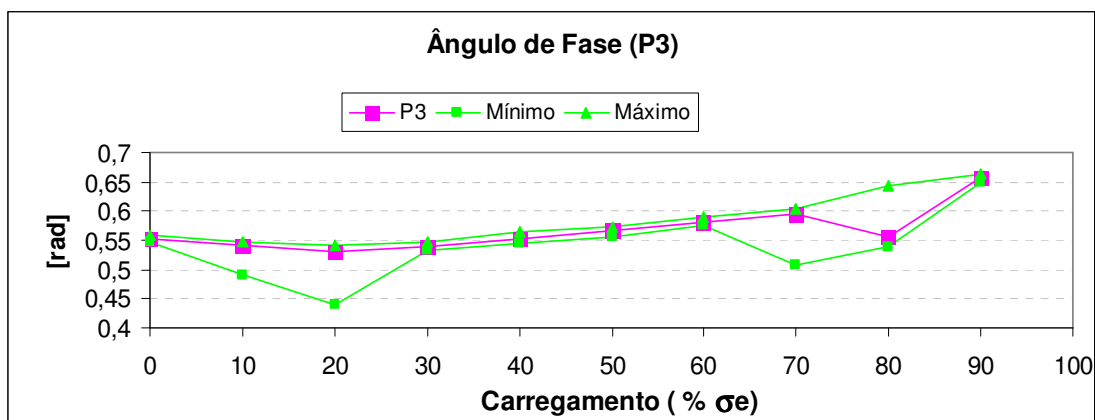


Figura 4.5 Ângulo de fase da terceira harmônica em função do carregamento.

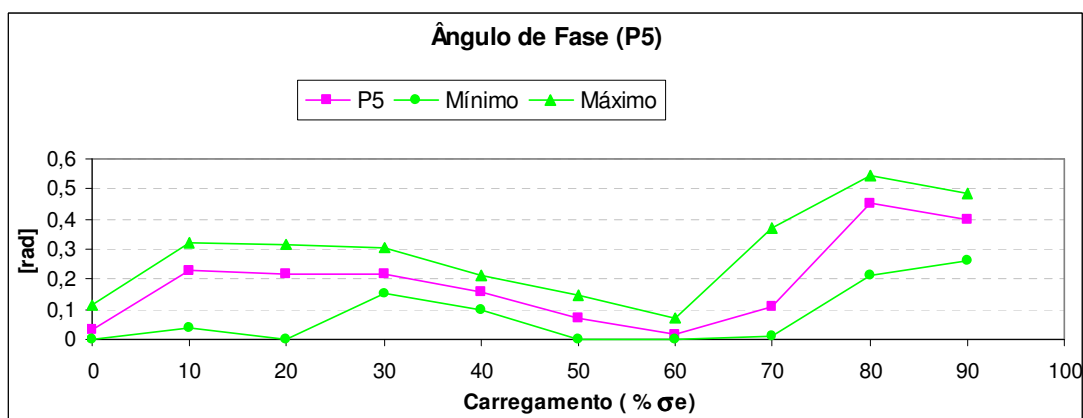


Figura 4.6 Ângulo de fase da quinta harmônica em função do carregamento.

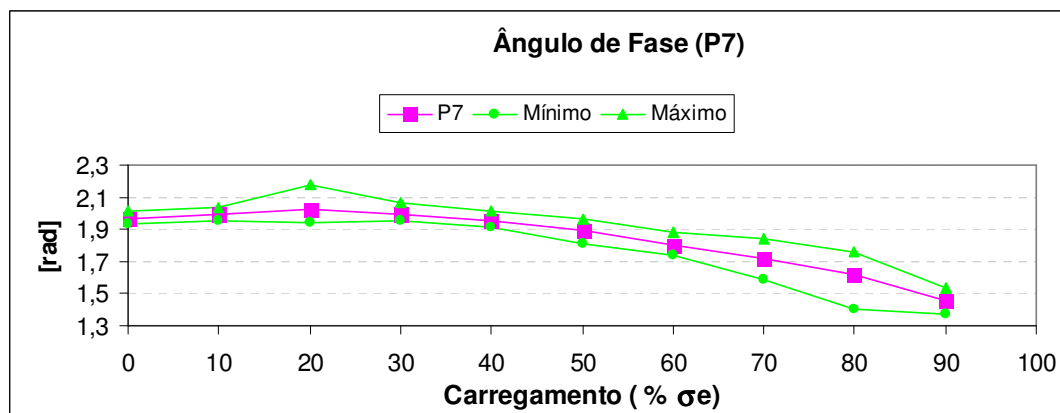


Figura 4.7 Ângulo de fase da sétima harmônica em função do carregamento.

A coercividade derivada da análise harmônica é analisada na Figura 4.8.

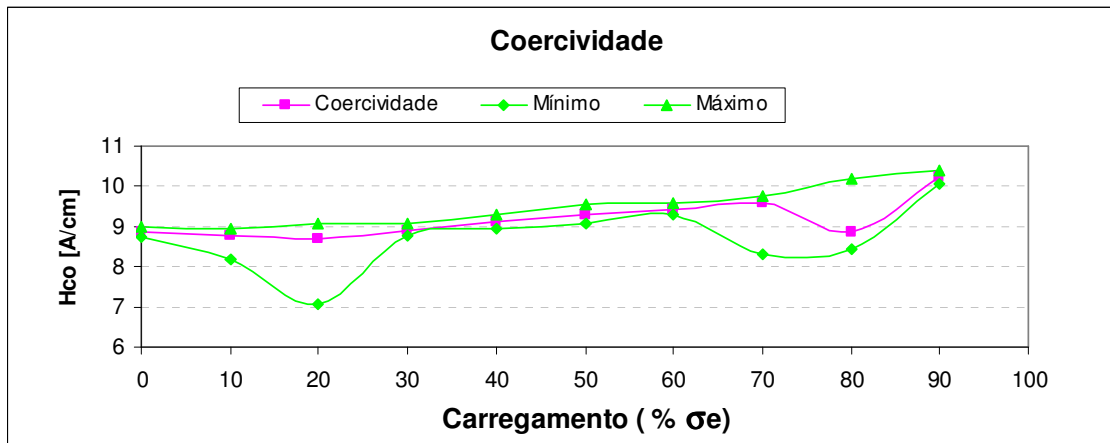


Figura 4.8 Coercividade derivada da análise harmônica em função do carregamento.

Para analisar a técnica de Análise Harmônica foi produzida uma curva de calibração com os resultados obtidos através da Equação 4.1, a curva obtida é representada na Figura 4.9.

$$F(\text{kN})_{\text{AHCT}} = 717,8 - 429,7 \cdot V_{\text{mag}} + 407,3 \cdot A_3 + 66,7 \cdot A_7 - 207,6 \cdot K - 0,74 \cdot H_{\text{co}}$$

Equação 4.1 Equação para curva de calibração do método de Análise Harmônica.

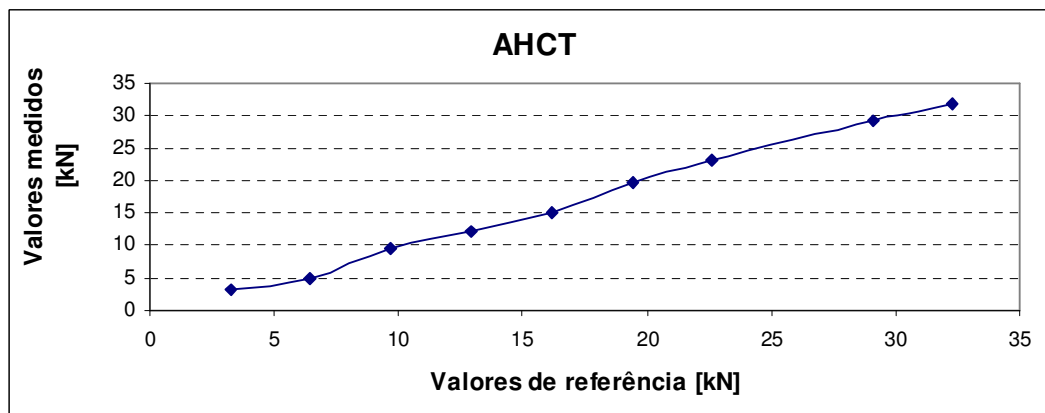


Figura 4.9 Curva de calibração para Análise Harmônica.

4.2 Análise do Ruído Barkhausen

Os parâmetros da técnica de Análise do Ruído Barkhausen (ARB) podem ser observados nas figuras a seguir. A coercividade apresentada na Figura 4.10 apresenta um aumento.

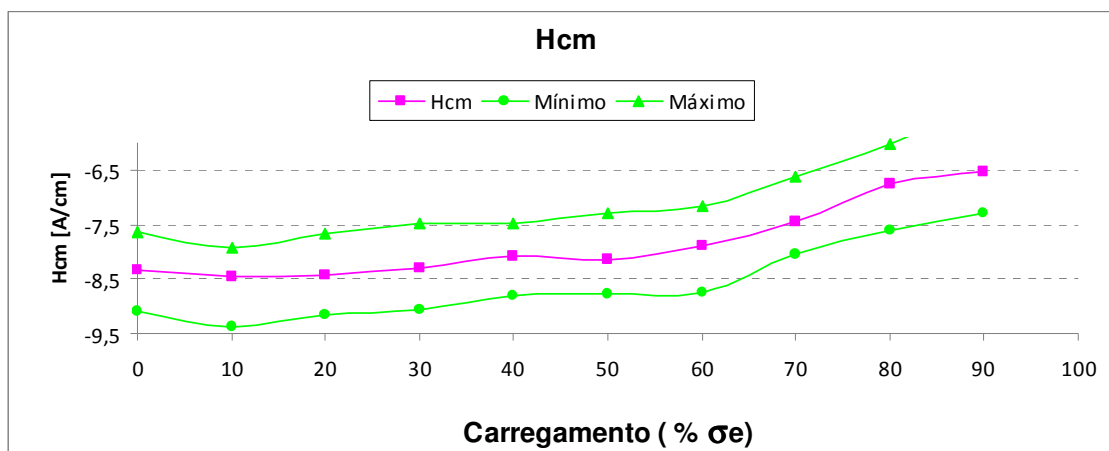


Figura 4.10 Coercividade derivada da ARB em função do carregamento

As amplitudes máximas e médias da curva de magnetização estão representadas nas Figuras 4.11 e 4.12, e mostram a diminuição da amplitude em função do carregamento. No entanto a amplitude para $H=0$ aumenta em função do carregamento e está demonstrado na Figura 4.13.

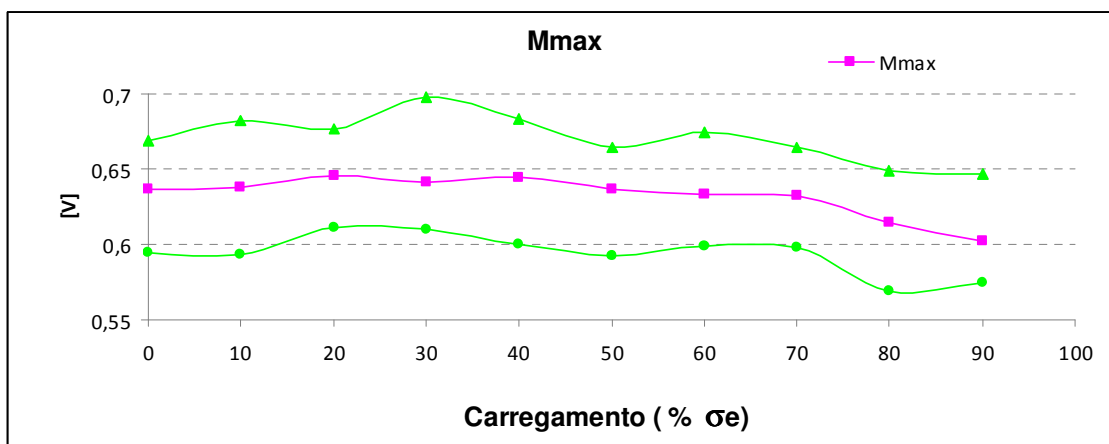


Figura 4.11 Amplitude máxima para um ciclo de magnetização em função do carregamento

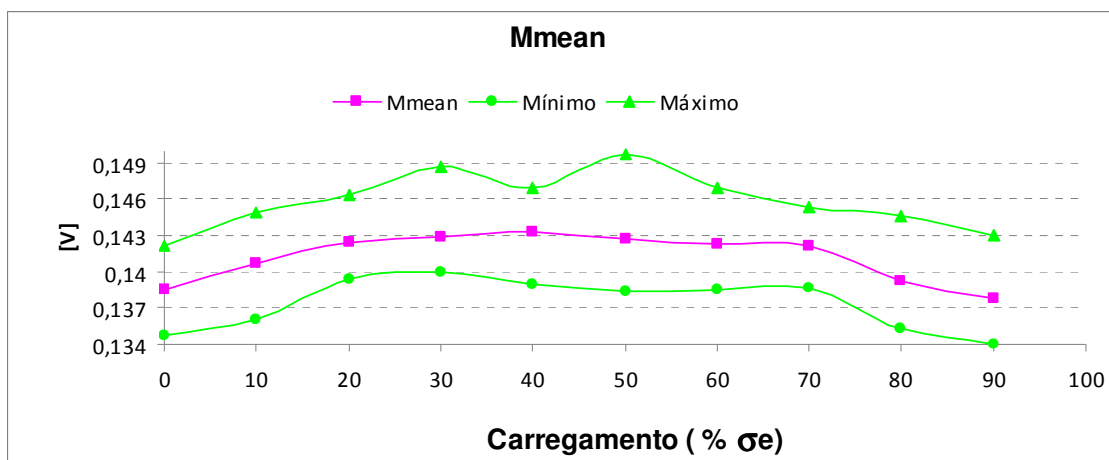


Figura 4.12 Sinal médio da curva para um ciclo de magnetização em função do carregamento

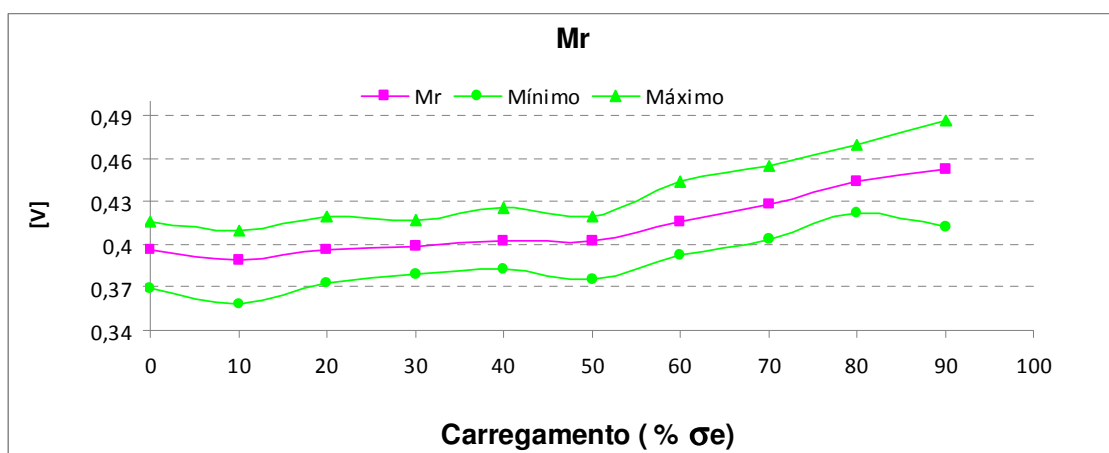


Figura 4.13 Amplitude da curva de magnetização para $H=0$ em função do carregamento

Os resultados para Ruído Barkhausen apresentam o monitoramento do pico, tendo para tanto a verificação da largura do pico a 25, 50 e 75% da altura da curva de magnetização. Estes resultados estão representados nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 respectivamente.

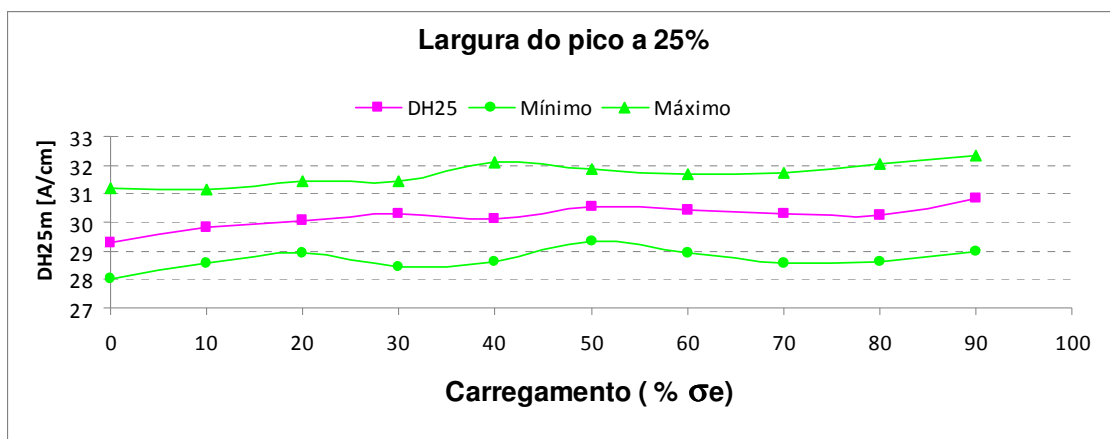


Figura 4.14 Largura da curva de magnetização para 25% de $M_{\text{máx}}$ em função do carregamento

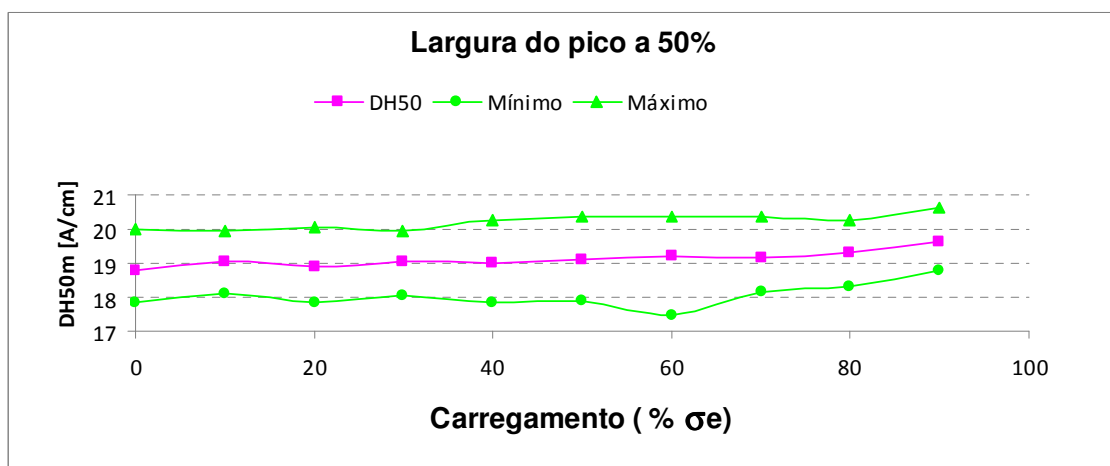


Figura 4.15 Largura da curva de magnetização para 50% de $M_{\text{máx}}$ em função do carregamento

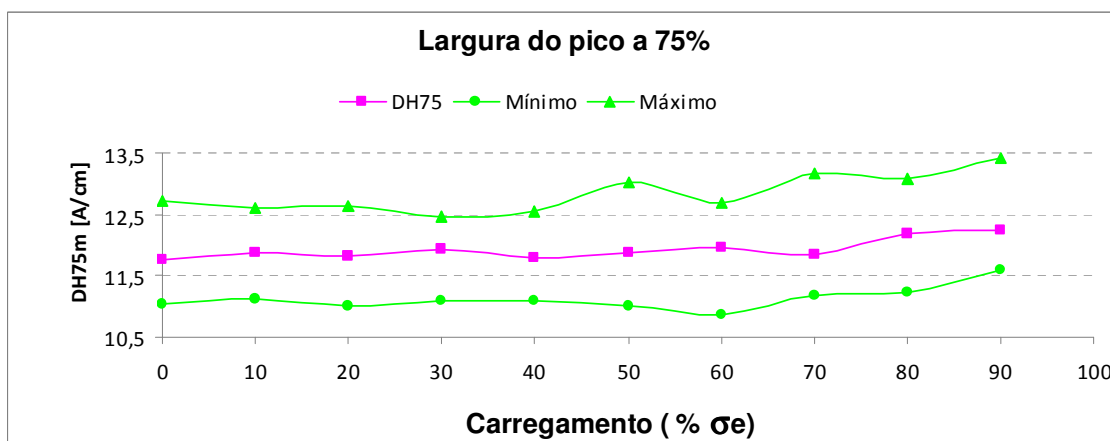


Figura 4.16 Largura da curva de magnetização para 75% de $M_{\text{máx}}$ em função do carregamento

Utilizando a equação fornecida pelo próprio equipamento, foi construída uma curva de calibração para a técnica de Análise do Ruído Barkhausen. Para essa curva de calibração foram utilizadas todas as variáveis de resposta da técnica e a curva está apresentada na Figura 4.17.

Equação 4.2 Equação para curva de calibração do método de Análise do Ruído Barkhausen

$$\text{Equação 4.2 } 604,97 - 481,3 * V_{\text{mag}} + 1403,3 * M_{\text{mean}} + 158,6 * M_r + 2,37 * H_{\text{cm}} + 3,21 * DH_{25} - 4,52 * R_3 - 205,2 * DH_{50} - 3,77 * DH_{75}$$

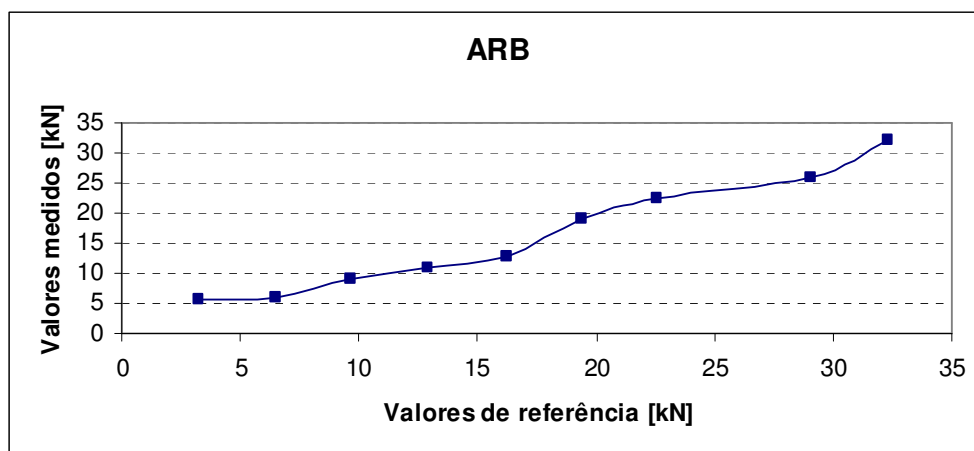


Figura 4.17 Curva de calibração para Análise do Ruído Barkhausen

4.3 Análise da Permeabilidade Incremental

Resultados para a técnica de Análise da Permeabilidade Incremental

A técnica da Análise da Permeabilidade Incremental também analisa parâmetros do comportamento do material no momento da magnetização e foram utilizados estes resultados para comparação com os resultados do Ruído Barkhausen na análise das tensões.

A Figura 4.18 apresenta a variação do campo coercivo derivado da permeabilidade, uma propriedade da técnica onde em função com o carregamento tem um aumento expressivo, recorrente do aumento da dificuldade de magnetização.

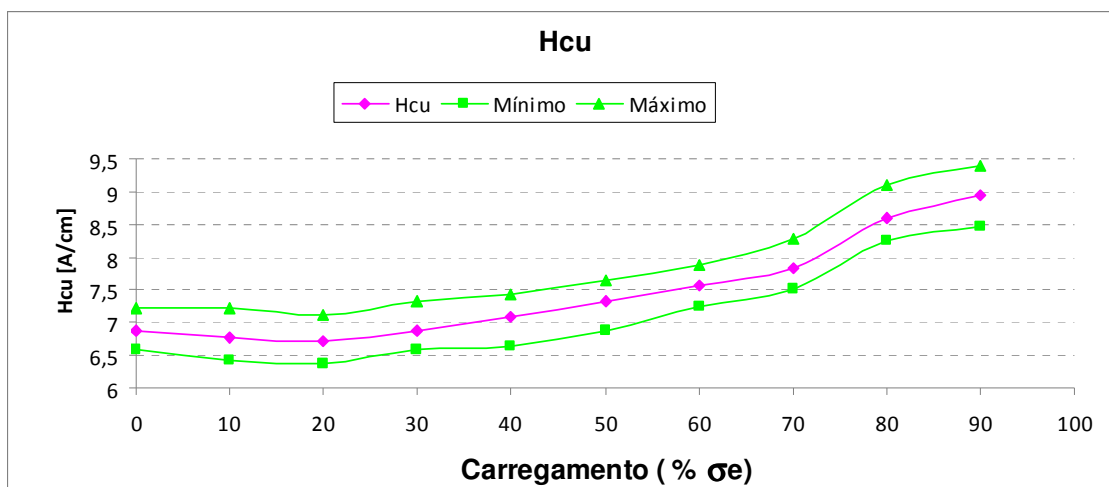


Figura 4.18 Campo coercivo derivado da permeabilidade incremental em função do carregamento

A Permeabilidade Magnética apresenta uma curva para um ciclo de magnetização e um dos parâmetros analisados é a amplitude máxima desta curva, em função do carregamento esta amplitude diminui e está representada na Figura 4.19.

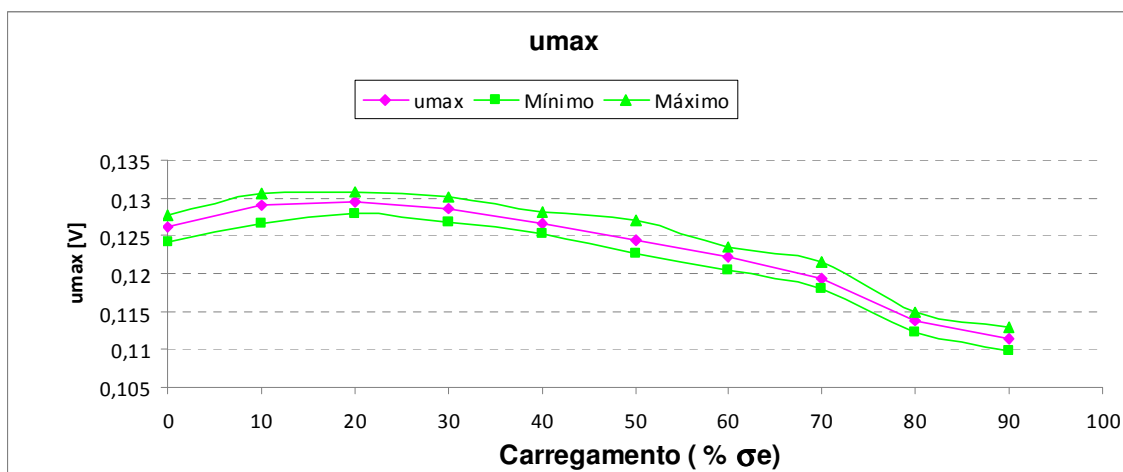


Figura 4.19 Amplitude máxima da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização em função do carregamento

Na mesma curva de um ciclo de magnetização é analisado o sinal médio da curva, e coerentemente diminuiu em função do carregamento, mostrado na Figura 4.20.

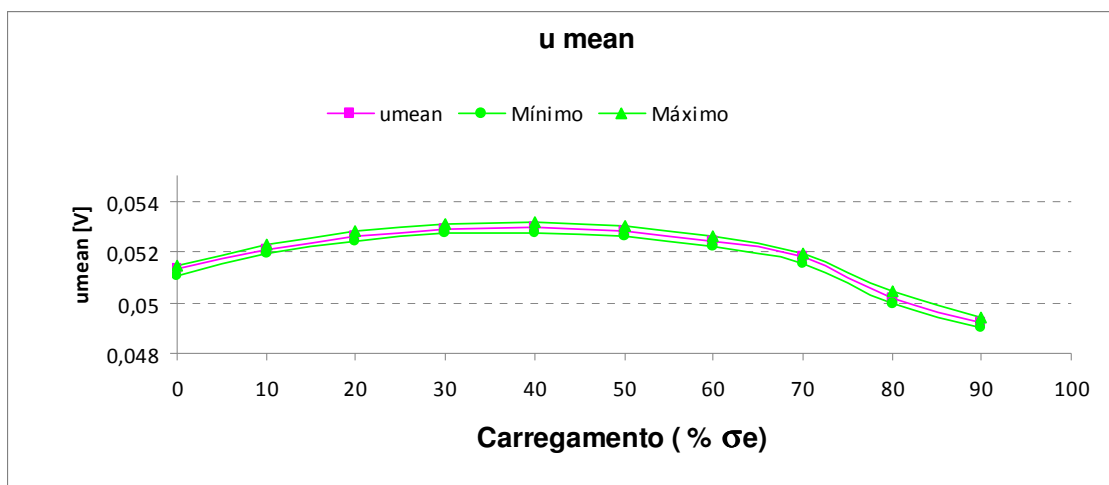


Figura 4.20 Sinal médio da curva $\mu(H)$ para um ciclo de magnetização em função do carregamento

Na medida da Permeabilidade Magnética a curva possui um ponto onde o campo coercivo é igual a zero ($H=0$), este ponto também é um parâmetro analisado pela técnica e está representado na Figura 4.21, onde é mostrado o decréscimo em função do carregamento.

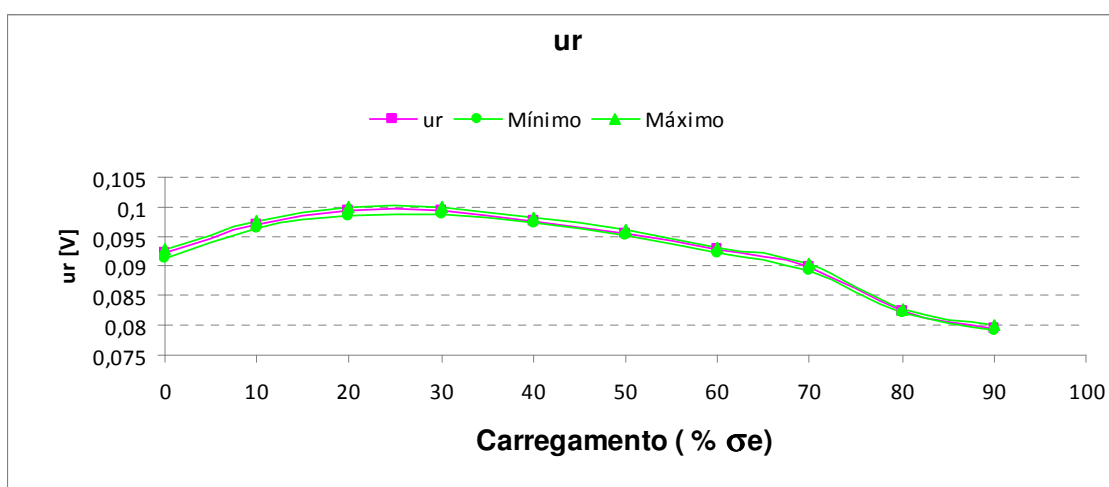


Figura 4.21 Sinal medido da curva $\mu(H)$ para $H=0$ em função do carregamento.

Assim como na técnica do Ruído Barkhausen, na Permeabilidade Incremental também são analisadas a largura do pico a 25, 50 e 75% da altura do pico da curva de magnetização. As curvas com os resultados da largura dos picos estão representadas na Figuras 4.22, 4.23 e 4.24 respectivamente.

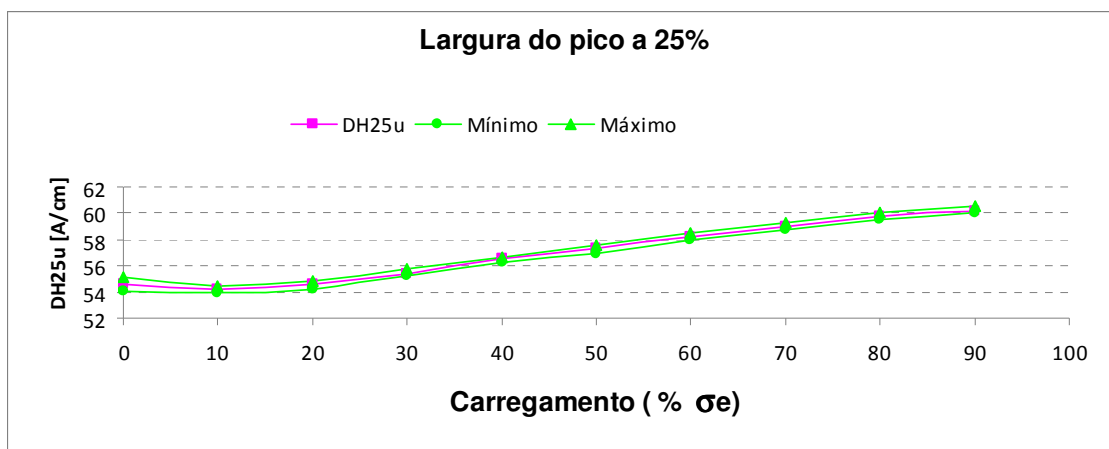


Figura 4.22 Largura da curva de magnetização para 25% de $\mu_{\text{máx}}$ em função do carregamento

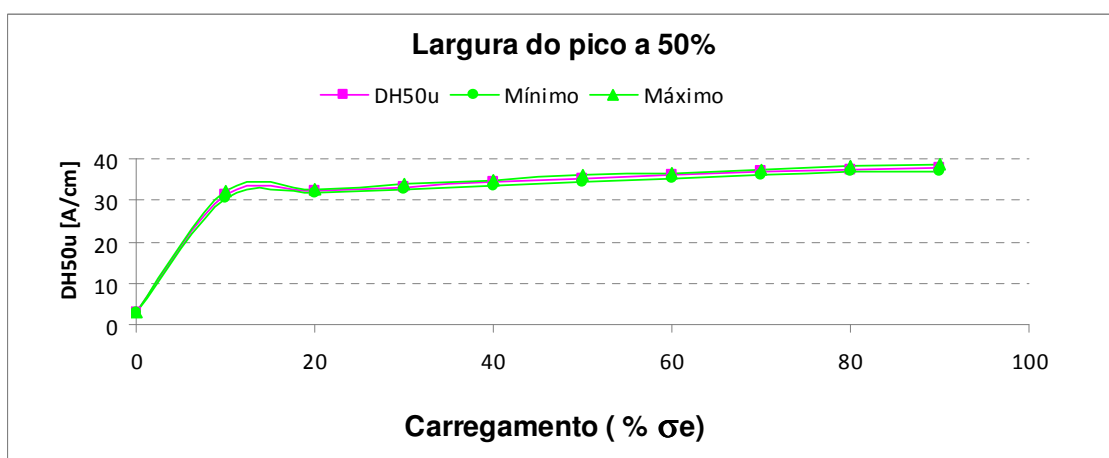


Figura 4.23 Largura da curva de magnetização para 50% de $\mu_{\text{máx}}$ em função do carregamento

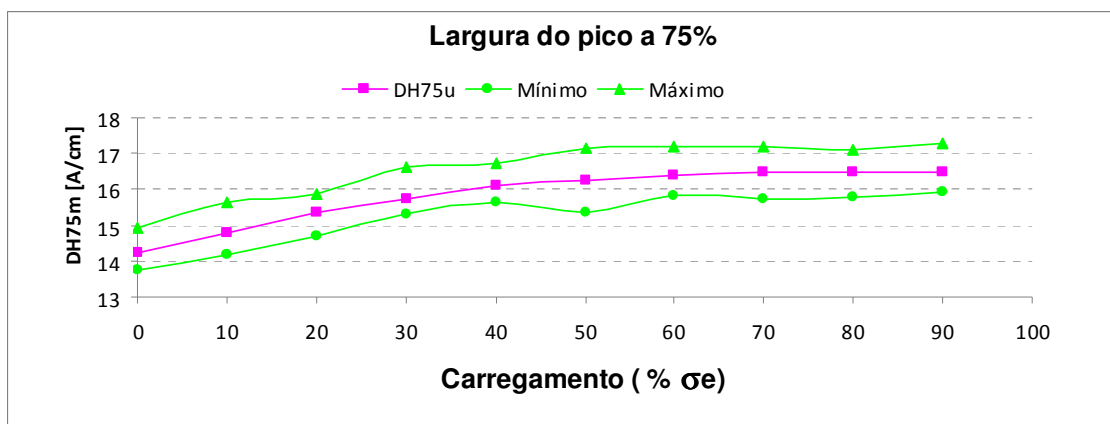


Figura 4.24 Largura da curva de magnetização para 75% de $\mu_{\text{máx}}$ em função do carregamento

Através da Equação 4.3 foi construída a curva de calibração para o método da Análise da Permeabilidade Incremental, utilizando todos os parâmetros da técnica. Esta curva está representada na Figura 4.25.

$$\text{Equação 4.3: } F(\text{kN})_{\text{API}} = -258,8 + 3118,6 \cdot u_{\text{max}} - 8627,1 \cdot u_{\text{mean}} + 2,24 \cdot H_{\text{cu}} + 1,28 \cdot \text{DH}25\text{u} + 7,17 \cdot \text{DH}50\text{u}$$

Equação 4.3 Equação para curva de calibração do método de Análise da Permeabilidade Incremental.

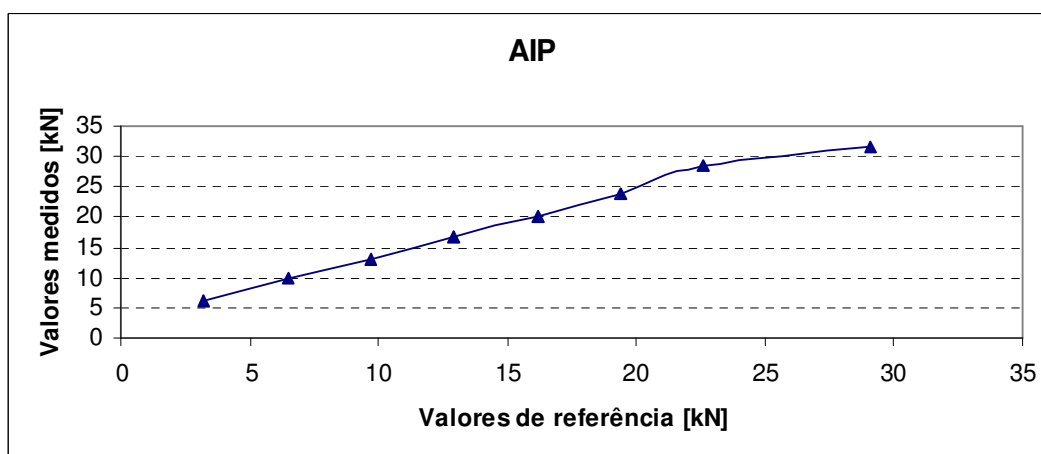


Figura 4.25 Curva de calibração para Análise da Permeabilidade Incremental

5.0 DISCUSSÃO

Neste trabalho foram realizadas medidas em tiras de Risers flexíveis através de métodos magnéticos para análise de tensões. Para a creditação do método do Ruído Barkhausen foram analisadas as técnicas de Análise Harmônica e Permeabilidade Incremental.

As análises foram feitas sem nenhum tipo de carregamento e depois analisado com carregamentos de 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% e 90% da tensão de escoamento, sendo analisada apenas a região de deformação elástica.

Segundo a literatura ao ser carregado, a magnetização se torna mais difícil, isso foi analisado e visualizado nas curvas que descrevem todos os parâmetros das técnicas analisadas. A curva de histerese de um material solicitado aumenta o valor do campo coercivo deixando a curva mais alargada. Esse fenômeno é devido à dificuldade de magnetização.

No caso da Análise das Harmônicas foram construídas curvas para comprovar que ao alargar a curva de histerese a amplitude da terceira, quinta e sétima harmônicas diminui, como está representado na Figura 5.1.

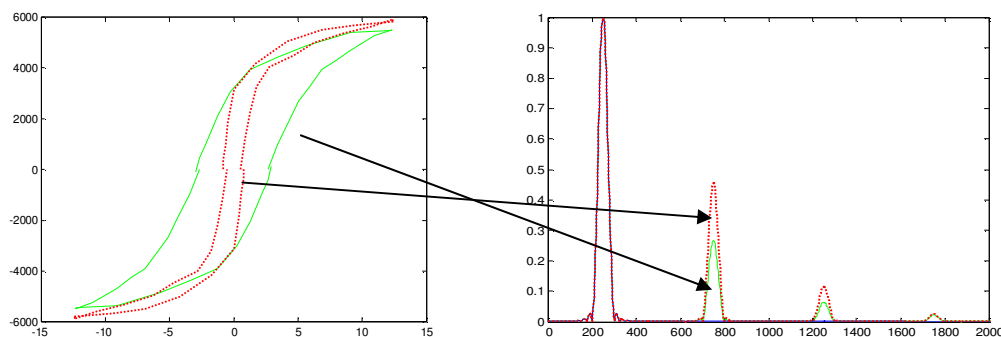


Figura 5.1 Comparação de curvas de histereses com a amplitude dos sinais das harmônicas.

Essa diminuição nas harmônicas está representada nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, mostrando que com o aumento do carregamento a amplitude das harmônicas diminuiu.

No estudo do método de Análise Harmônica do Campo Magnético Tangencial mostra que a coercividade do material aumenta, reforçando a idéia de dificuldade de magnetização, já que a coercividade é a dificuldade de mudança dos domínios magnéticos.

Na análise do Ruído Barkhausen vê-se uma pequena diminuição na amplitude máxima e média do campo magnético para um ciclo de magnetização, porém a amplitude M_r que representa a amplitude para $H=0$ aumenta, estes resultados mostram que com o aumento do carregamento a magnetização também é dificultada, onde a curva é alargada. Os resultados da largura do pico a 25%, 50% e 75% demonstram como a curva é alargada.

A análise da Permeabilidade Incremental, que é uma característica do material sustenta as duas técnicas anteriores. As curvas de amplitude da curva para um ciclo de magnetização diminuem, no entanto para $H=0$ a permeabilidade aumenta durante o carregamento. A largura do pico a 25%, 50% e 75% da amplitude máxima aumenta durante o carregamento, comprovando a dificuldade de magnetização.

Ainda para a Permeabilidade Incremental nota-se o aumento expressivo do campo coercivo para a técnica.

Para as curvas de calibração vê-se uma maior sensibilidade na Análise do Ruído Barkhausen, as outras técnicas apresentam uma maior estabilidade no resultados, porém as três técnicas mostram a mesma característica validando então a análise de tensões pelo método do Ruído Barkhausen.

6.0 CONCLUSÕES

O trabalho mostra que o aumento do carregamento dificulta a magnetização, sendo possível a análise através de vários métodos.

A comparação da Análise do Ruído Barkhausen com a Análise das Harmônicas do Campo Tangencial e Análise da Permeabilidade Incremental foi satisfatória, todos os parâmetros mostraram comportamento coerente com a teoria.

Os resultados também mostraram a maior sensibilidade da técnica de Ruído Barkhausen, no entanto esta sensibilidade não alterou nenhuma conclusão, já que os parâmetros foram coerentes com os outros métodos.

7.0 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar tensões em arames de Risers Flexíveis com Lift Off para ser coerente com a vida em trabalho dos arames de Risers Flexíveis.

Desenvolvimento de sensores com a área de magnetização compatível com a geometria do arame.

Utilização de outras técnicas de análise de tensões para comparação.

4.0 REFERÊNCIAS

- 1) MARTINS, C., O., D., “Desenvolvimento de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões”, Tese, 2008.
- 2) CAMERINI, C., “Inspeção e Monitoração de Dutos Flexíveis”, I Workshop sobre Tecnologias de Ensaios Não Destrutivos”, UFRGS, Porto Alegre, 2006
- 3) MARINHO, M. G., ET all, “Surface Monitoring Techniques for a Continuous Flexible Riser Integrity Assessment”, Offshore Technology Conference – USA – 2007
- 4) PETROBRAS N-2409 “Flexible Pipe Specification”, Norma Técnica, CONTEC – 1994.
- 5) RUBIN, A., Gudme, J., “Qualification of Steel Wire for Flexible Pipes”, 61ST ANNUAL CONFERENCE & EXPOSITION – CORROSION, NACEexpo2006, paper n 06149
- 6) Farias, Alexandre R., Caracterização do Ruído Magnético Barkhausen em Materiais Estruturais Utilizando Transformada Wavelet, 2005.
- 7) CHIKAZUMI, S. *Physics of Magnetism*, 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1966. 554p.
- 8) JILES, D., Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman & Hall : USA, 1998.
- 9) SIPAHI, L. B. Overview of Applications of Micromagnetic Barkhausen Emissions as Noninvasive Material Characterization Technique. *Journal of Applied Physics*, v.75, n.10, p6978-6980, Maio 1994.
- 10) KAMEDA, J., RANJAN, R. Nondestructive Evaluation of Steels Using Acoustic and

Magnetic Barkhausen Signals – I. Effect of Carbide Precipitation and Hardness. *Acta Metallurgica*, v. 35, n.7, p.1515-1526, 1987.

11) KARJALAINEN, P., RAUTIOAHO, R. Applications of Barkhausen Noise Measuremen

12) MAASS, P. et al. Detection and classification of material attributes – a practical application of wavelet analysis, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 48, n. 8, p. 2432 - 2438, August 2000.

13) FLAMMINI, A., et al. Robust Estimation of Magnetic Barkhausen Noise Based on a Numerical Approach. *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, p.1214-1219. Budapest, 2001.

14) PASLEY, R. L. *Barkhausen Effect – An Indication of Stress*, 29th national Fall Conference of the American Society for Nondestructive Testing, Oct. 13-16, 1969, Philadelphia, Pa.

15) “3MA – II System – User Manual”, Fraunhofer – Institut Nondestructive testing (IZFP), 2007

16) TIT, K., “Use of Barkhausen Effect in Testing for Residual Stresses and Materials Defects”, Em: *Handbook of Residual Stress and Deformation*, ASM, 2002, p. 27-35.

17) KWUN, H., BURKHARD, G. L., “Electromagnetic Techniques for Residual Stress Measurements Methods of Nondestructive Evaluation”, Em: *Handbook of Residual Stress and Deformation*, ASM, 2002, p. 159 - 162

18) ROSENDO, T., S. "Análise Micromagnética de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento", tese, 2005.