
**DEPARTAMENTO DE METALURGIA E MATERIAIS DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**MEDIDA DE CAMADA TEMPERADA POR INDUÇÃO DE SEMI-EIXO PELO
ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS**

Aluno: Paulo José Mendes

Orientador: Prof. Dr. Hélio Goldenstein

1997

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
RESUMO	v
1. OBJETIVO	1
2. INTRODUÇÃO	2
3. CORRENTES PARASITAS	3
3.1. Definição	3
3.2. Aplicações	3
3.3 Vantagens e Limitações do Processo de Correntes Parasitas	4
3.4. Princípio do Método	5
3.5. Variáveis e Fatores que Afetam o Ensaio de Correntes Parasitas	8
3.5.1. Skin-Effect	8
3.5.2. Condutividade Elétrica	9
3.5.3. Permeabilidade Magnética	11
3.5.4. Efeito Lift-Off	12
4. TÊMPERA POR INDUÇÃO	14
4.1. Princípios Básicos	14
4.2. Aplicações	15
4.2.1 Semi-Eixos para Caminhões e Ônibus	16
5. MATERIAL E MÉTODOS	17
5.1. Preparação dos Semi-Eixos Padrão de Calibração	17
5.1.1 Medidas dos Semi-Eixos Padrões	20
5.2. Equipamento de Correntes Parasitas	23
5.2.1. Calibração do Equipamento	24
6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	30
7. CONCLUSÕES	38
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Princípio do funcionamento do método de correntes parasitas	6
Figura 3.2: Ilustração do funcionamento do método de correntes parasitas	6
Figura 3.3: Efeito de uma trinca no padrão do fluxo de correntes parasitas em um tubo	7
Figura 3.4: Variação da densidade de correntes parasitas em uma peça	8
Figura 3.5: Variação da densidade de correntes parasitas em função da distância à superfície	9
Figura 3.6: Diagrama típico do plano de impedância para a variação da condutividade dos materiais. Frequência de teste de 100 kHz	10
Figura 3.7: Curva de magnetização do ferro e do níquel	11
Figura 4.1: Dois diferentes tipos de bobinas com os respectivos aquecimentos	15
Figura 4.2: Posicionamento do semi-eixo no eixo traseiro	16
Figura 5.1: Fotografia da (a) estria e da (b) flange	17
Figura 5.2: Medidas de projeto na flange e na estria	18
Figura 5.3: Simulação da têmpera por indução na flange (a), haste (b) e estria (c)	19
Figura 5.4: Fotografia de seção longitudinal da flange após ataque químico	21
Figura 5.4: Fotografia de seção longitudinal da estria após ataque químico	21
Figura 5.4: Fotografia de seção longitudinal da haste após ataque químico	21
Figura 5.7: Equipamento de correntes parasitas	23
Figura 5.8: Bobinas utilizadas para calibração	24
Figura 5.9: Possível jogos de parâmetros a serem utilizados na página 3	26
Figura 5.10: Amplitude dos harmônicos mostrado na página 4	27
Figura 5.11: Correlação obtida em ensaio	28
Figura 5.12: Regressão realizada no plano de impedância com valores de algumas peças	28
Figura 6.1: Comparação gráfica entre os ensaios realizados na haste	31
Figura 6.2: Comparação gráfica entre os ensaios realizados no raio da flange	33
Figura 6.3: Comparação gráfica entre os ensaios realizados no diâmetro da flange	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Composição química do aço DIN 42CrMo4	17
Tabela 5.2: Parâmetros utilizados na têmpera por indução dos semi-eixos	20
Tabela 5.3: Valores de Eht na haste dos semi-eixos	22
Tabela 5.4: Valores obtidos nas medidas da flange	22
Tabela 5.5: Valores obtidos nas medidas da estria	22
Tabela 5.6: Valores possíveis a serem utilizados nos parâmetros primários	25
Tabela 6.1: Correlação obtida para os parâmetros na haste	30
Tabela 6.2: Valores fornecidos para obtenção de valores de correlação na haste	30
Tabela 6.3: Comparação de valores entre os ensaio destrutivos e ensaios não-destrutivos	31
Tabela 6.4: Correlação obtida para os parâmetros no raio da flange	32
Tabela 6.5: Valores fornecidos para obtenção de valores de correlação no raio da flange	32
Tabela 6.6: Comparação de valores entre os ensaio destrutivos e ensaios não-destrutivos na região do raio da flange	33
Tabela 6.7: Correlação obtida nos parâmetros para o diâmetro da flange	34
Tabela 6.8: Valores fornecidos para obtenção de valores de correlação no diâmetro da flange	34
Tabela 6.9: Comparação de valores entre os ensaio destrutivos e ensaios não-destrutivos na região do diâmetro da flange	34
Tabela 6.10: Correlação obtida nos parâmetros para a saída	36
Tabela 6.11: Correlação obtida nos parâmetros para a saída da estria	36
Tabela 6.12: Comparação de valores entre os ensaio destrutivos e ensaios não-destrutivos na região da saída da estria	37

RESUMO

Os ensaios não-destrutivos tem se tornado cada vez mais importantes ferramentas para o controle de qualidade de produtos industriais. Isto, devido ao seu menor custo, garantia de qualidade, eficiência e segurança de produtos testados. Pois, neste tipo de ensaio as peças não são destruídas e nem ao menos danificadas.

O ensaio por correntes parasitas, que é um ensaio não destrutivo, consiste em colocar o material a ser testado sob a ação de um campo magnético alternado, que é produzido por uma bobina de teste alimentada por uma corrente alternada. Essa bobina gera um campo magnético primário H_p , que gera as correntes parasitas no material testado. As correntes parasitas geram um campo magnético secundário H_s , que tem direção contrária ao campo magnético primário. O sinal da bobina de teste é formado pela sobreposição dos dois campos magnéticos. O sinal da bobina depende da condutividade elétrica, permeabilidade magnética e dimensional da peça. Variando-se qualquer uma destas variáveis ocorre uma mudança no sinal da bobina, sendo possível caracterizar o material utilizado.

Este trabalho estuda as incertezas em que se consegue medir camadas temperadas por indução em semi-eixos, utilizados em caminhões e ônibus, através do método de correntes parasitas.

1. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo propor um método de medição de camada temperada por indução de semi-eixos, utilizados em caminhões e ônibus, através do método de correntes parasitas.

Para isso, foram realizadas experiências para conhecer qual o intervalo de confiança onde é possível trabalhar com o equipamento, de modo a conhecer sua viabilidade de se trabalhar junto a produção.

2. INTRODUÇÃO

Os ensaios não-destrutivos tem se tornado cada vez mais importantes ferramentas para o controle de qualidade de produtos industriais. Isto, devido ao seu menor custo, garantia de qualidade, eficiência e segurança de produtos testados. Pois, neste tipo de ensaio as peças não são destruídas e nem ao menos danificadas.

O menor custo nos ensaios não-destrutivos é decorrente da desnecessidade de destruir a peça durante ensaio. Portando podendo-se ensaiar um número muito maior de peças, chegando-se em alguns casos de ensaiar até 100% das peças de um lote. Outra vantagem é a possibilidade de ensaiar peças já montadas no seu local de trabalho, fazendo com que seja possível analisar a condição da peça após um trabalho em campo. Esta aplicação é muito importante para a utilização em equipamentos em que a necessidade de segurança é essencial, como nas indústrias espaciais, aeroespaciais e automobilística.

Entres os ensaios não-destrutivos, o ensaio de correntes parasitas pode ser considerado o ensaio mais versátil, pois possibilita as mais diferentes aplicações, como: separação de materiais, determinação de dureza e espessura, localização de trincas entre outros. Uma das grandes vantagens do ensaio de correntes parasitas em relação aos outros ensaios não destrutivos é a possibilidade total de automação do ensaio.

Este trabalho busca estudar as possibilidades e limitações de se determinar a profundidade de camada temperada por indução em semi-eixos através do ensaio de correntes parasitas.

3. CORRENTES PARASITAS

3.1 Definição

Segundo norma ABNT, correntes parasitas ou correntes de Foucault podem ser definidas como “correntes elétricas induzidas em um condutor pela variação no tempo ou no espaço de um campo magnético aplicado”¹.

3.2 Aplicações

O método de ensaio por correntes parasitas é um ensaio não-destrutivo. Neste tipo de ensaio não há necessidade de se destruir a peça ensaiada. Os principais ensaios não-destrutivos são o ensaio visual, o ensaio por líquido penetrante, raio-x, ultra-som, partículas magnéticas e correntes parasitas. Cada ensaio tem um emprego em que é aplicado mais adequadamente. Por exemplo, o líquido penetrante é somente utilizado para a detecção de trincas que sejam superficiais².

Já o ensaio por correntes parasitas é versátil, permitindo inúmeras aplicações. A principal aplicação é a detecção de descontinuidades no interior de peças. Atualmente o método de correntes parasitas é muito utilizado em indústrias em que a segurança e perfeita condições de peças e componentes são essenciais, tais como: a indústria nuclear, aeroespacial, espacial, automobilística, etc..³.

O método de correntes parasitas, além da detecção de descontinuidades, pode ser utilizado para identificar ou diferenciar entre uma larga variedade de propriedades físicas, estruturais e condições metalúrgicas em diferentes tipos de materiais metálicos.

Algumas das possíveis aplicações, são^{3, 4, 5}:

- ◇ Medida ou identificação de propriedades como condutividade elétrica, permeabilidade magnética, tamanho de grão, condição de tratamento térmico, dureza e dimensões físicas.

- ◇ Detecção de descontinuidades em materiais ferrosos e não ferrosos.

-
- ◇ Classificação de diferentes tipos de metais e detecção de diferenças na sua composição, microestrutura e propriedades.
 - ◇ Medição da espessura de revestimento não condutor em um metal condutor, ou a espessura de um revestimento não magnético em um metal magnético.

Com todas as características citadas acima, percebe-se um campo muito vasto de aplicações possíveis para o método. Algumas aplicações mais específicas são:

- a) Inspeção e controle de espessura de paredes de tubos de trocadores de calor, utilizados em petroquímicas ou na geração de energia, para uma estimativa de sua vida residual⁵.
- b) Inspeção de soldas longitudinais em tubos e canos soldados para verificar a existência de possíveis descontinuidades³.
- c) Inspeção de estrutura de aeronaves. Devido a diminuição do tamanho do aparelho de teste, este tipo de teste está sendo cada vez mais utilizado na inspeção de antigas aeronaves civis e militares, sem que seja necessário desmontar a aeronave³.

3.3 Vantagens e Limitações do Processo de Correntes Parasitas

As principais vantagens deste ensaio são:

- a) Ensaio de alta velocidade com indicação imediata do resultado^{4, 6, 7}.
- b) Na maioria das aplicações, não existe contato direto entre a bobina e a superfície da peça a ser ensaiada^{6,7}.

-
- c) Existe a possibilidade de alto grau de automação e elevadas velocidades de inspeção, sendo que as bobinas podem ser integradas nas máquinas de produção^{4, 7}.
 - d) Ensaio não-destrutivo: não há necessidade de destruir a peça testada e realiza-se o ensaio na peça acabada⁶.
 - e) Não exige uma preparação superficial rigorosa da peça a ser ensaiada, não há necessidade de material de consumo e devido a sua versatilidade pode ser utilizado em diferentes aplicações⁴.

As limitações existente são:

- a) Não é possível identificar claramente a natureza das descontinuidades^{4, 6}.
- b) Em algumas aplicações para detecção de descontinuidades em materiais ferromagnéticos, é necessário saturar magneticamente o material antes do ensaio^{6, 12}.
- c) A profundidade de penetração do ensaio é limitada e dependente da frequência e do material ensaiado^{4, 6}.
- d) Em algumas aplicações, os resultados são qualitativos e não quantitativos^{4, 6}.

3.4 Princípio do Método

Ao testar um material pelo método de correntes parasitas estão sendo caracterizadas sua permeabilidade magnética, condutividade elétrica e suas dimensões geométricas⁸.

O ensaio por correntes parasitas consiste em colocar o material a ser testado sob a ação de um campo magnético alternado, que é produzido por uma bobina de teste alimentada por uma corrente alternada. Como pode ser visto na

figura 3.1, o campo magnético gerado pela bobina, induz a formação de correntes parasitas no material^{3, 5, 8}.

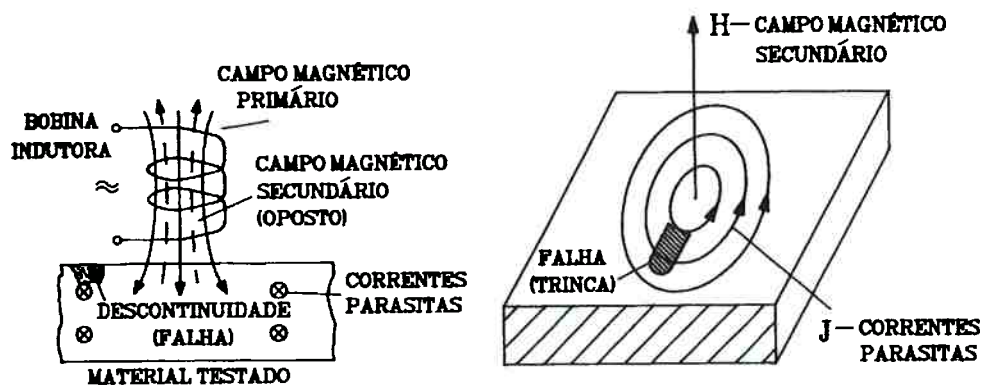


Figura 3.1: Princípio do funcionamento do método de correntes parasitas⁸

A bobina que gera um campo magnético alternado chama-se bobina indutora. Essa bobina gera um campo magnético primário H_p , que gera as correntes parasitas no material testado. As correntes parasitas geram um campo magnético secundário H_s , que tem direção contrária ao campo magnético primário, figura 3.2.

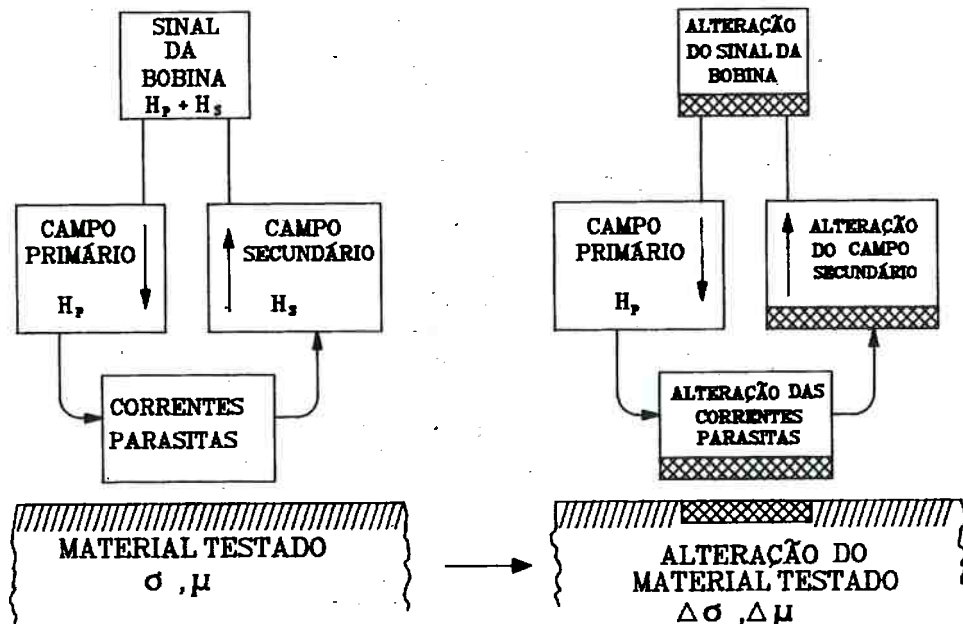


Figura 3.2: Ilustração do funcionamento do método de correntes parasitas⁸

Portanto existem dois campos magnéticos, o primário gerado pela bobina indutora e o secundário gerado pelas correntes parasitas com direção oposta ao

primário. O sinal da bobina de teste é formado pela sobreposição dos dois campos magnéticos. Com isso o sinal da bobina depende:

- geometria do sistema de teste;
- frequência de teste;
- características magnéticas e elétricas do material testado;
- dimensões do material testado;

Estas dependências formam a base do método de correntes parasitas, fazendo com que possa ser medida por este método a alteração das dimensões das peças trabalhadas e classificar os materiais com respeito as diferentes características magnéticas e elétricas⁸.

Mas, como foi dito anteriormente, a principal utilização do método de correntes parasitas é a detecção de descontinuidades. A figura 3.3, mostra a mudança do fluxo de correntes parasitas devido à presença de uma trinca.

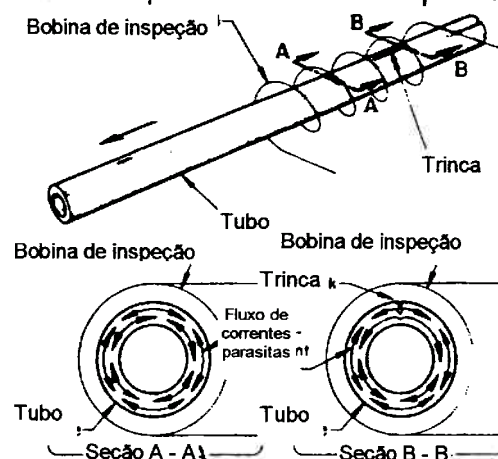


Figura 3.3: Efeito de uma trinca no padrão do fluxo de correntes parasitas em um tubo³

Na seção A-A não existe a presença de trincas e o fluxo de correntes parasitas é simétrico. Na seção B-B existe a presença de uma trinca, que impede a passagem das correntes parasitas fazendo com que exista uma mudança na direção do fluxo, causando mudanças significativas no campo magnético associado e fazendo com que exista uma alteração do sinal de medição da bobina, no qual a descontinuidade pode ser detectada. A trinca só é identificada se ocorrer interrupção do fluxo das correntes parasitas. Caso a

trinca esteja paralela ao fluxo de correntes parasitas a interrupção não vai ser significativa e poderá não ser detectada³.

3.5 Variáveis e Fatores que Afetam o Ensaio de Correntes Parasitas

3.5.1 Skin-Effect

A frequência de ensaio escolhida determina a profundidade de penetração do campo magnético no material testado. Quanto mais alta for a frequência, menor será a profundidade de penetração e maior a densidade de correntes parasitas perto da superfície do material testado. Conforme se afasta da superfície em direção ao interior do objeto testado existe uma diminuição na densidade de correntes parasitas, como pode ser visto na figura 3.4. Este fenômeno é denominado "SKIN EFFECT"^{3, 8}.

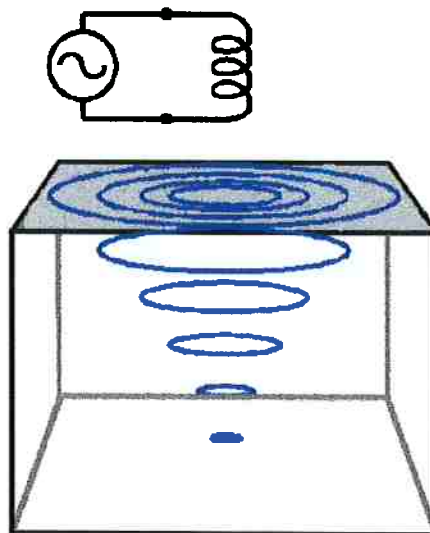


Figura 3.4: Variação da densidade de correntes parasitas em uma peça⁵

Este fenômeno pode ser explicado da seguinte forma: as correntes parasitas que são geradas em qualquer lugar da peça geram um campo magnético secundário oposto ao primário. Portanto, ocorre uma diminuição do fluxo magnético efetivo que causará uma diminuição das correntes parasitas conforme se aumenta a profundidade do material⁸.

A figura 3.5 mostra a variação da densidade de corrente em função da distância abaixo da superfície. Como pode-se notar, ocorre uma diminuição na intensidade das correntes parasitas com o aumento da profundidade de penetração. Quando a densidade de correntes parasitas é reduzida a

aproximadamente 37% da densidade de correntes parasitas na superfície, é definida essa profundidade como sendo a profundidade de penetração padrão^{3,8}.

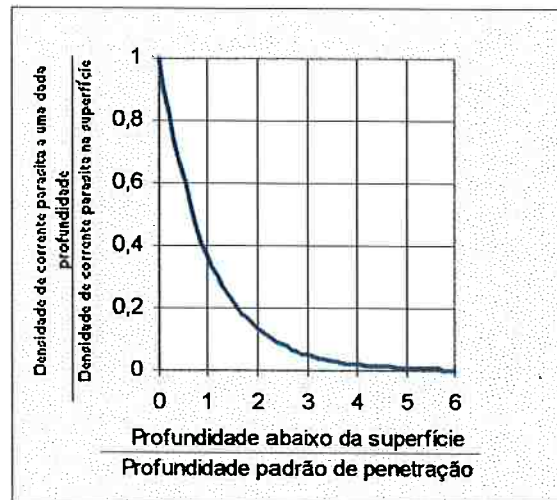


Figura 3.5: Variação da densidade de correntes parasitas em função da distância à superfície

A profundidade de penetração padrão pode ser calculada, por:

$$d = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{10^7}{\mu_{rel}\sigma f} \right)^{0,5}$$

d = Profundidade de penetração padrão (mm)

$\mu = \mu_{rel} \mu_0$ = Permeabilidade magnética (H/m)

σ = Condutividade elétrica (m/Ωmm²)

f = Frequência da bobina (s⁻¹)

Portanto, é possível constatar que a profundidade de penetração padrão depende da condutividade e permeabilidade magnética do material, e da frequência da bobina. E que a profundidade de penetração é inversamente proporcional à raiz quadrada dessas variáveis.

3.5.2 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica indica a facilidade com que um material conduz a corrente elétrica. Materiais em que a resistência a condução é tão alta que teoricamente não é possível existir um fluxo de corrente são classificados como

isolantes. Os materiais que tem resistência intermediária são classificados como semicondutores, e os que tem baixa resistência são classificados como condutores, que incluem todos os metais, porém com uma variação de condutividade entre eles ^{3, 9, 10}.

A capacidade de conduzir corrente pode ser medida por condutividade ou sua recíproca, a resistividade. Muitos fatores influem a condutividade de um metal, notavelmente, temperatura, composição, tratamento térmico e microestrutura resultante, tamanho de grão, dureza e tensão residual^{3, 6, 9}.

Um dos modos de se medir a condutividade é feita em porcentagem segundo o International Annealed Copper Standard, IACS, no qual a condutividade do cobre recozido foi arbitrariamente definida como sendo 100%. A condutividade dos outros metais são expressas em porcentagem do cobre padrão, por exemplo o alumínio puro tem IACS de 61%^{3, 6}.

A variação da condutividade faz com que ocorra uma variação da impedância segundo a curva do plano de impedância da figura 3.6. Portanto, através das correntes parasitas consegue-se calcular o valor de condutividade de um material pela sua posição na curva de impedância¹¹.

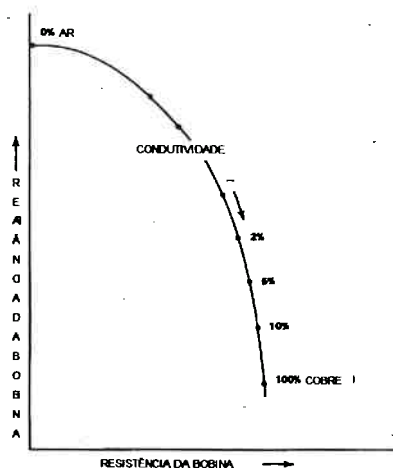


Figura 3.6: Diagrama típico do plano de impedância para a variação da condutividade dos materiais. Frequência de teste de 100 kHz¹¹

3.5.3 Permeabilidade Magnética

Os materiais ferromagnéticos e suas ligas agem de forma a concentrar o fluxo de campo magnético. Eles são fortemente atraídos por ímãs, tendo uma

alta e variável permeabilidade magnética, que não é necessariamente uma constante para o material dado, variando com o meio específico em que atua a densidade de fluxo e a intensidade do campo magnético³.

Sendo assim, a permeabilidade magnética de um material é a razão entre a intensidade do campo magnético e a densidade de fluxo magnético.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

μ = permeabilidade magnética do material

\vec{B} = densidade do fluxo magnético

\vec{H} = intensidade do campo magnético

No caso dos materiais ferromagnéticos, a curva que mostra a relação existente entre a intensidade de campo magnético aplicado na peça (H) e a densidade de fluxo induzido nela (\vec{B}) é conhecida como curva de magnetização. Na figura 3.7, tem-se as curvas de magnetização dos níquel e do ferro. Pela curva tem-se que aumentando a intensidade do campo magnético (H), a densidade de fluxo magnético cresce rapidamente, mas logo diminui chegando em um momento em que por mais se aumente o valor de H quase não existe um aumento de B. Neste ponto se diz que o material está magneticamente saturado^{3,9}.

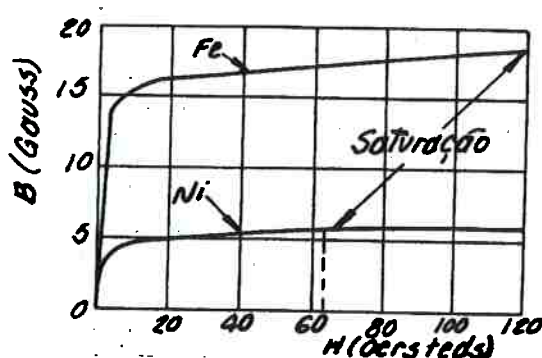


Figura 3.7: Curva de magnetização do ferro e do níquel⁹

Portanto, como as correntes parasitas são induzidas pela variação do campo magnético, a permeabilidade magnética do material inspecionado influencia fortemente as respostas das correntes parasitas³.

Um dos meios de descrever as propriedades magnéticas dos sólidos, é a permeabilidade magnética relativa. Que é a razão entre a permeabilidade magnética e a permeabilidade magnética relativa ao vácuo.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o}$$

onde μ_r = permeabilidade magnética relativa ao vácuo

μ_o = permeabilidade magnética do vácuo (valor constante) e igual a

$1,25 \times 10^{-6}$ Volts x segundos/ Ampere x metro

A permeabilidade magnética relativa é um número adimensional que indica quantas vezes a permeabilidade magnética de um certo material é maior que a do vácuo. A partir dos valores de μ_r pode-se classificar os materiais como: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos^{9, 10}.

Os materiais ferromagnéticos tem uma valor de μ_r bem superior a 1, como exemplo de alguns dos materiais ferromagnéticos, pode-se citar o ferro, níquel, e o cobalto. Para o ferro o μ_r tem valor aproximadamente de 100. Os materiais paramagnéticos, alumínio, cromo, magnésio entre outros, são fracamente atraídos por um ímã e o valor de μ_r é ligeiramente maior que 1. Os materiais diamagnéticos (cobre, mercúrio e zinco) são fracamente repelidos por um ímã, e o valor de μ_r é ligeiramente menor que 1^{9, 10}.

As variáveis que afetam a permeabilidade magnética são as mesmas que afetam a condutibilidade elétrica^{3, 8}.

3.5.4 Efeito Lift-Off

Em um ensaio de correntes parasitas o acoplamento entre a bobina teste e o objeto testado é de grande importância. O acoplamento entre a bobina teste e o objeto testado varia com o espaçamento entre os dois. O efeito deste espaçamento acarreta uma mudança na impedância que é denominado efeito lift-off^{3,8}.

Em uma bobina energizada, mesmo não existindo nenhuma peça no seu interior, existe a indicação de uma impedância. Conforme é colocado um condutor na sua proximidade, esse valor se altera. O campo eletromagnético é

mais forte perto da bobina e dissipa-se com a distância da bobina. Isto causa um pronunciado efeito lift-off para pequenas variações no espaçamento entre a bobina e o objeto testado. O efeito lift-off é geralmente indesejado, causando aumento de ruído e reduzindo um bom acoplamento³.

Outro problema que pode ocorrer é o efeito de borda, quando a bobina de inspeção está muito próxima a borda ou fim da peça. Neste caso as correntes parasitas são distorcidas pois não existe um fluxo perto da borda da peça. Portanto, deve-se evitar inspecionar a distâncias muito próximas a borda da peça³.

4. TÊMPERA POR INDUÇÃO

A têmpera por indução dos aços combina uma das mais antigas tecnologias, a têmpera de aços, com uma das mais recentes, o aquecimento por indução. A têmpera tem sua origem na Idade do Ferro, aproximadamente 1000 a.c., e a indução eletromagnética descoberta nas experiências de Faraday por volta de 1830¹².

A têmpera por indução é um dos métodos de têmpera superficial, que consiste em produzir uma têmpera localizada apenas na superfície da peça, a qual irá adquirir as propriedades e características da microestrutura martensítica¹³.

Existem vários motivos de se fazer uma têmpera superficial ao invés de uma têmpera total: ¹³

- a) Dificuldades de tratar termicamente peças de grande dimensões nos fornos de tratamento térmico convencional, devido a praticidade e custo.
- b) Possibilidade de se endurecer apenas áreas críticas das peças, como dentes de engrenagem
- c) Possibilidade de melhorar a precisão dimensional evitando-se o endurecimento total;
- d) Possibilidade de utilizar aços mais baratos no lugar de aços liga
- e) Maior controle do processo, podendo-se obter diferentes variações de dureza e profundidade de têmpera em seções distintas da peça.

4.1 Princípios Básicos

A têmpera por indução tem os seus princípios muito parecidos com às das correntes parasitas. Ambas as técnicas dependem do princípio de indução eletromagnética para induzir correntes parasitas numa peça disposta dentro ou próxima da bobina de indução. O aquecimento da peça ocorre devido a resistência da peça ao fluxo de correntes induzidas, ocorrendo aquecimento por efeito Joule (RI^2). Porém a grande diferença é que no aquecimento gerado por indução são utilizados altos níveis de potência, enquanto nas correntes parasitas utilizam-se baixos níveis de potência de forma a minimizar as perdas por calor e mudanças de temperatura ^{3, 7, 14}.

Na têmpera por indução, a distribuição do aquecimento é determinado por: ^{13, 14}

- a) Formato da bobina;
- b) Número de espiras na bobina;
- c) Frequência de operação;
- d) Potência fornecida ao circuito de corrente alternada;
- e) Características do material da peça;

A figura 4.1 mostra duas diferentes possibilidades de aquecimento por indução por bobinas de diferentes formas.

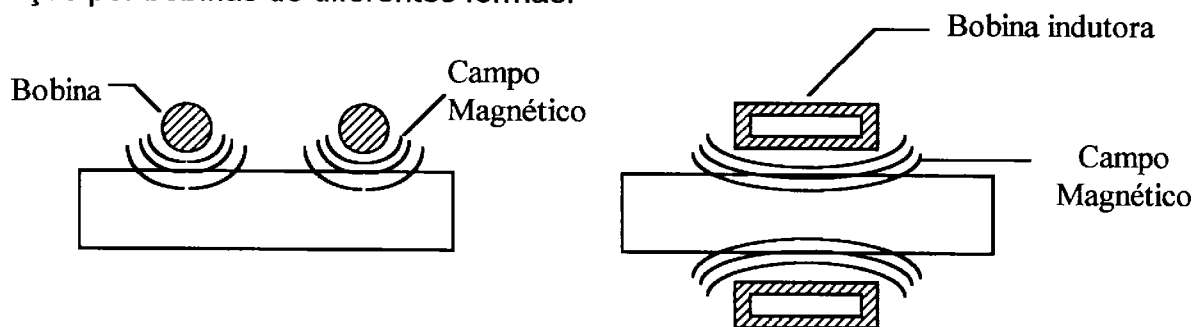


Figura 4.1.: Dois diferentes tipos de bobina com os respectivos aquecimentos¹⁴

Como nas correntes parasitas a profundidade de penetração da corrente depende diretamente da permeabilidade, da condutividade e da frequência. Sendo que neste caso o principal fator é a frequência. Quando existe necessidade de uma camada rasa de têmpera utiliza-se alta frequência; utilizam-se frequências intermediárias ou baixas quando há necessidade de camadas mais profundas¹⁴.

4.2 Aplicações

Desde que a têmpera por indução foi introduzida para aplicações comerciais, ela tem sido utilizada para uma variada gama de produtos em produção em massa e produção comercial em geral. As primeiras aplicações envolveram a indução de peças em aço axissimétricas, como o semi-eixo. Hoje, as suas aplicações são as mais variadas possíveis, algumas aplicações são:¹⁴

◊ Na área de transportes têm sido utilizados em eixos de transmissão, semi-eixos, engrenagens, virabrequim, eixo de comando de válvula, entre outros.

◊ Em equipamentos algumas peças que podem ser induzidas são o barramento, eixos em geral e engrenagens de transmissão.

◊ Em ferramentas com martelo, alicates, cilindros de laminação, etc.

4.2.1 Semi-eixos para caminhões e ônibus

Os semi-eixos são componentes que transmitem momento torçor e velocidade do diferencial para as rodas dos veículos, sofrendo uma forte solicitação dinâmica durante seu uso, sendo esta solicitação quase que totalmente por torção. A figura 4.2 mostra a posição do semi-eixo no eixo traseiro.

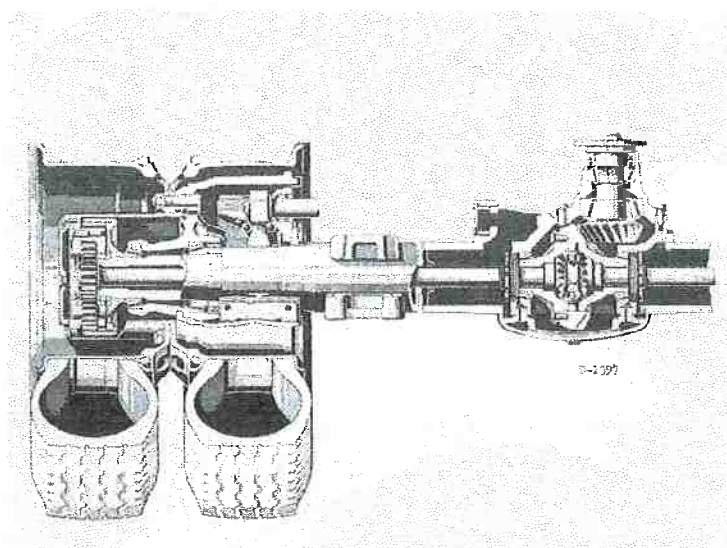


Figura 4.2: Posicionamento do semi-eixo no eixo traseiro

O principal objetivo de se temperar por indução semi-eixos é colocar a superfície dos mesmos sob um estado de tensões residuais de compressão. Pois, por este método consegue-se obter um aumento da resistência a fadiga em aproximadamente 200%, se comparado a um tratamento térmico convencional. Outra vantagem é a possibilidade de se utilizar aços pouco ligados, já que se conseguiu um aumento nas propriedades do aço só com a têmpera por indução¹⁴.

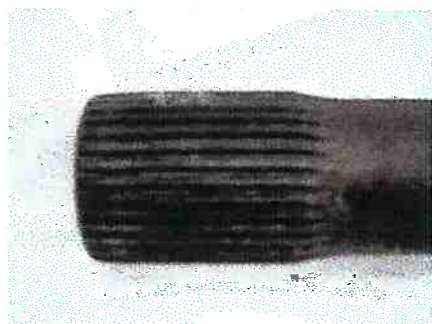
5. MATERIAL E MÉTODOS

Na experiência foram utilizados 16 semi-eixos de aço DIN 42CrMo4 com a composição conforme a tabela 5.1.

Tabela 5.1: Composição química do aço DIN 42CrMo4

Elemento	Porcentagem do total (%)
C	0,38 - 0,45
Si	0,15 - 0,40
Mn	0,50 - 0,80
P	≤ 0,035
S	≤ 0,035
Cr	0,90 - 1,20
Mo	0,15 - 0,30
Ni	≤ 0,60

O semi-eixo tem diferentes características de camada induzida ao longo do seu eixo principal. Portanto, para o seu estudo ele é dividido em três partes: a flange, a haste e a estria. A figura 5.1. mostra uma fotografia da flange e da estria do semi-eixo utilizado.



(a)



(b)

Figura 5.1: Fotografia da (a) estria e da (b) flange

5.1 Preparação dos semi-eixos padrões de calibração

Os 16 semi-eixos foram separados em pares, formando-se portanto oito grupos de semi-eixos com 2 pares. Os semi-eixos foram temperados por indução

com diferentes regulagens, de modo que houvesse uma variação nas medidas de indução. Porém, em cada grupo de dois semi-eixos foi utilizada a mesma calibração, de modo que os dois semi-eixos ficassem com as medidas de indução o mais próximas possíveis.

A figura 5.2 mostra quais são as medidas de indução especificadas em projeto para flange e estria. Na flange existem duas medidas principais: o diâmetro e o raio. O diâmetro pode variar entre 72 mm e 78 mm e o raio entre 4,0 mm e 6,0 mm. Na estria é importante a distância entre o fim da camada induzida e o chanfro no final do semi-eixo. Esta medida pode variar entre 1,5 mm e 4,0 mm. Esta medida é necessária porque na região estriada do semi-eixo é colocada a engrenagem planetária, e se esta região estiver muito dura quando é realizada a montagem pode ocorrer lascamento. Na haste a medida importante é a profundidade de camada induzida, que está especificado entre 6 mm e 8 mm.

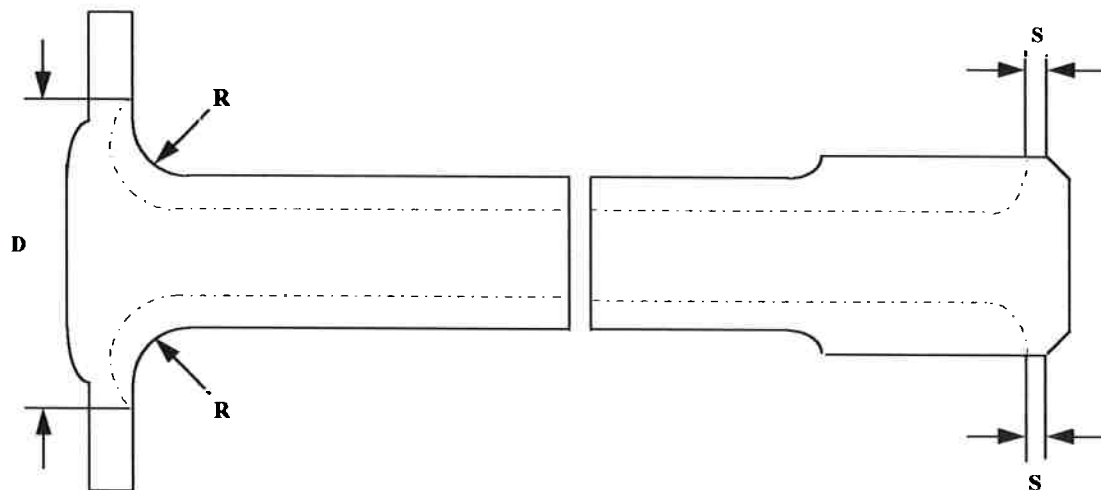


Figura 5.2: Medidas de projeto na flange e na estria

Na indução dos semi-eixos foi utilizada uma máquina EMA de 3 kHz de frequência (média frequência) e 150 kW de potência nominal. A figura 5.3 mostra uma simulação de como é realizada a indução dos semi-eixos na flange (a), haste (b) e estria (c).

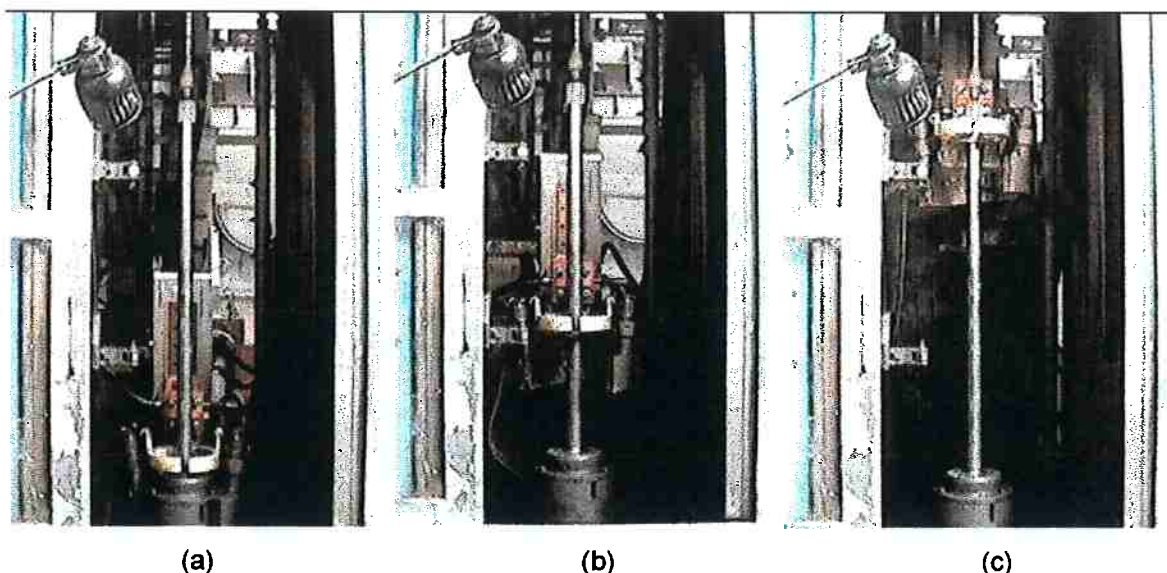


Figura 5.3: Simulação da têmpera por indução na flange (a), haste (b) e estria (c)

A têmpera por indução do semi-eixo inicia-se na flange, com o indutor a uma distância da peça de 1,6 mm. É feito um pré-aquecimento de 7,0 segundos para aquecimento da flange, e o indutor avança verticalmente com uma velocidade de 9,2 mm/s percorrendo a haste em direção a estria. Quando o indutor se aproxima do final da estria, ele desliga para que o final da peça não seja temperado por indução. Juntamente com o indutor tem-se o chuveiro que faz o resfriamento rápido da peça, com uma solução de água e óleo na concentração de 12% a 16%.

Para que as peças ficassem com diferentes valores de medidas de têmpera por indução foram variados os parâmetros de indução, conforme mostrado na tabela 5.2.

Cada mudança de parâmetro faz com que ocorra uma mudança nas medidas de indução de uma parte do semi-eixo. A distância entre o indutor e a peça quanto menor, faz com que o aquecimento na região da flange seja maior e consequentemente a penetração da tempera por indução seja maior; portanto o raio e o diâmetro tem valores maiores. O tempo de pré-aquecimento quando maior, tem o mesmo efeito que a diminuição da distância indutor-peça. Quanto maior for a velocidade de avanço, menor será o tempo de aquecimento e portanto uma menor profundidade de camada temperada na haste.

Tabela 5.2: Parâmetros utilizados na têmpera por indução dos semi-eixos

Nº do par	Velocidade de avanço (mm/s)	Tempo de pré- aquecimento (s)	Distância Indutor - Peça (mm)
1	9,2	7,0	1,6
2	9,6	7,5	1,6
3	10,0	8,0	1,6
4	8,6	6,5	1,6
5	9,2	7,0	1,6
6	8,2	6,5	1,4
7	9,0	7,0	1,6
8	9,2	7,0	1,6

O controle da saída da peça, final da estria, é feito monitorando-se o ponto em que o indutor é desligado. Mas não se obtém um controle preciso, por exemplo, se o avanço do indutor é alto mesmo desligando-se o indutor, pois uma parte da peça ainda é temperada por indução.

5.1.1 Medidas dos semi-eixos padrões

Os semi-eixos, após serem temperados por indução, foram cortados com intuito de determinar as medidas obtidas na têmpera por indução. De cada par de semi-eixos foi escolhido um para ser destruído. No semi-eixo foram feitos cortes transversais para retirar a flange, a estria e uma seção da haste de aproximadamente 6 mm de espessura.

Na seção da haste foi realizada microdureza Vickers para determinar a profundidade da camada temperada por indução. Foram feitos cortes longitudinais na flange e na estria. Nestas partes foram realizadas lixamento e polimento com consequente ataque. As medidas foram feitas através de ensaio visual com auxílio de lupa com até 10 vezes de aumento. As figuras 5.4 e 5.5 mostram uma seção longitudinal da flange e da estria após ataque químico pronta para se realizar o ensaio visual. A figura 5.6 mostra uma seção longitudinal da haste após ataque químico, como foi dito na haste a medida é feita através de microdureza.

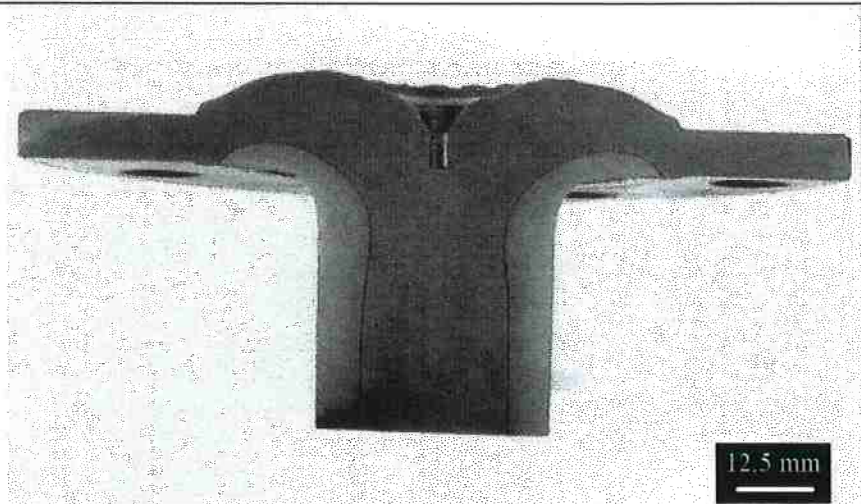


Figura 5.4: Fotografia de seção longitudinal da flange após ataque químico

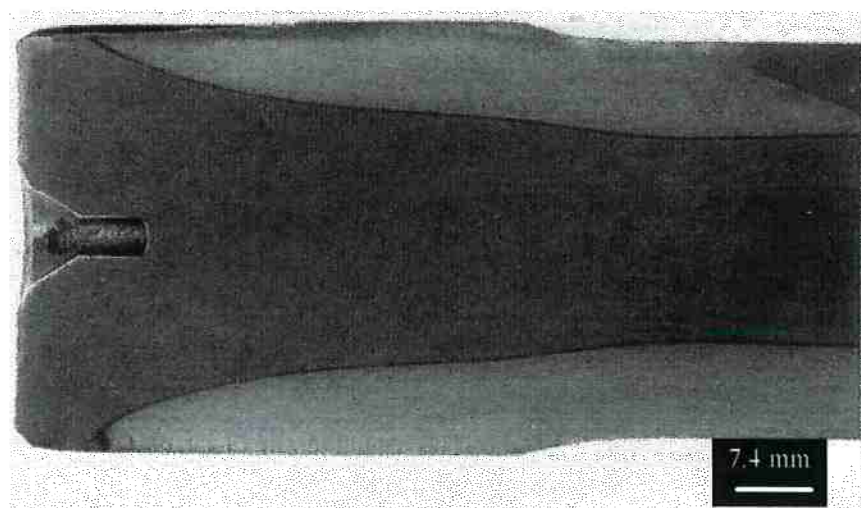


Figura 5.5: Fotografia de seção longitudinal da estria após ataque químico

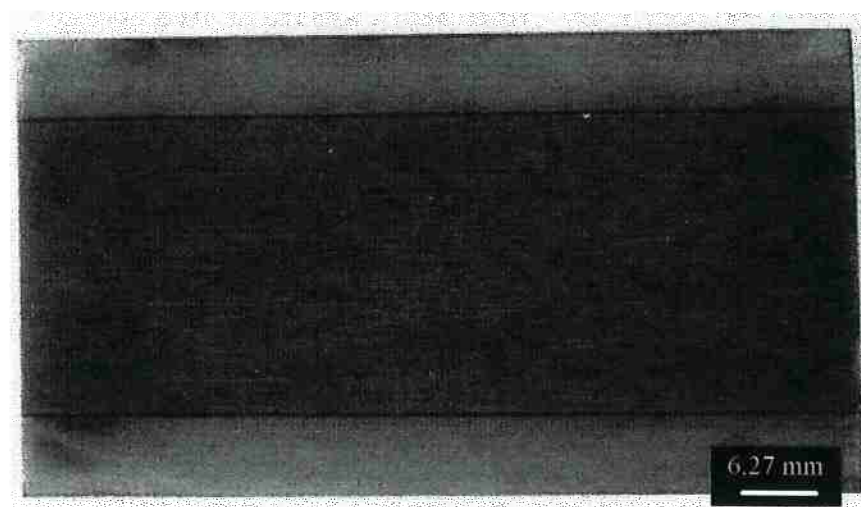


Figura 5.6: Fotografia de seção longitudinal da haste após ataque químico

Os resultados obtidos nas medidas estão mostrados nas tabelas 5.3, 5.4 e 5.5

Tabela 5.3: Valores de Eht na haste dos semi-eixos

Número	Eht (mm)
1	7,3
2	6,6
3	6,2
4	8,5
5	6,4
6	8,7
7	6,7
8	6,8

Tabela 5.4: Valores obtidos nas medidas da flange

Número	Raio (mm)	Diâmetro (mm)
1	4,2 - 4,3	74,8
2	4,1 - 4,2	73,8
3	4,4 - 4,5	74,3
4	3,2	70,0
5	4,0	73,8
6	4,6 - 4,8	71,2
7	3,7	73,3
8	3,4	71,8

Tabela 5.5: Valores obtidos nas medidas da estria

Número	Saída (mm)
1	2,0
2	3,0
3	2,5
4	0,0
5	0,0
6	7,0
7	0,0
8	3,2 - 3,5

Na seção longitudinal da flange, existem dois locais para se medir o diâmetro e o raio, sendo que em alguns semi-eixos estes valores não são iguais. Na saída (tabela 5.5) os valores 4, 5 e 7 foram colocados como tendo valor igual a zero. Mas, na prática só o valor 5 é igual a zero. O valor zero é definido quando o final da têmpera por indução corresponde ao início do chanfro. Nas peças 4 e 5, a região temperada por indução passou do início do chanfro. Portanto, os dois valores poderiam ser considerados negativos, mas o equipamento não aceita valores negativos na sua calibração.

5.2 Equipamento de correntes parasitas

O equipamento de correntes parasitas utilizado é o MAGNATEST S da empresa Foerster - Imaden, que utiliza o software SGP 1.7. O equipamento consiste em uma impressora, uma caixa multiplexadora, um teclado externo, um controlador e três bobinas. A figura 5.7 mostra o equipamento.



Figura 5.7: Equipamento de correntes parasitas

Neste caso utilizam-se três bobinas: uma para medir a flange, uma para a haste e uma para estria. As bobinas são de baixa frequência e podem trabalhar numa frequência entre 2 Hz e 1000 Hz. A bobina da haste tem diâmetro interno de 50 mm, da flange 55 mm e da estria 62 mm. As bobinas da flange e da estria são conhecidas como “meias bobinas”, pois o campo magnético é muito maior em uma direção. Em um lado da bobina, quase não existe campo eletromagnético pois existe um isolante. Este tipo de bobina é utilizado, para que o campo eletromagnético primário seja mais focalizado em

um pedaço da peça. A figura 5.8 mostra as três bobinas utilizadas na estria (a), haste (b) e flange (c).

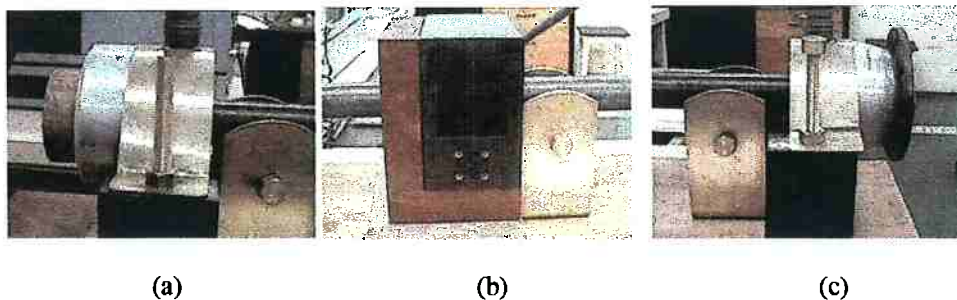


Figura 5.8: Bobinas utilizadas para calibração

Para a realização das experiências foi construído um dispositivo. O dispositivo tem como principal objetivo de que os semi-eixos sejam testados sempre na mesma posição. A distância entre a bobina de teste e a peça deve ter sempre um valor aproximadamente constante. Isto é muito importante neste ensaio, pois pequenas mudanças de distâncias podem levar a mudanças significativas no valor de impedância (efeito “lift-off”).

Na estria foi utilizado junto com o dispositivo normal um dispositivo de madeira (figura 5.8 (a)) que tem como objetivo que a estria seja testada sempre na mesma posição. Pode no entanto existir pequena variação no comprimento da peça fazendo com que mude o valor de impedância correto.

Além disso, como na região estriada é utilizado uma meia-bobina, este dispositivo faz com que o final da peça fique bem próximo da interface bobina-isolante.

5.2.1 Calibração do equipamento

O equipamento utiliza um software de controle, que trabalha com três diferentes modos de controle: ajuste, calibração e teste. No modo ajuste prepara-se o equipamento para um novo teste; na calibração determina-se o valor ótimo para os teste utilizando-se como base de comparação peças com características conhecidas; no modo teste as peças com características desconhecidas são testadas.

O software utilizado trabalha com diferentes telas, sendo que cada tela é definida como uma página. Para mostrar como é realizada a calibração o método mais simples é a explicação do conteúdo de cada página.

A calibração inicia-se na página 2, primeiro escolhe-se o modo ajuste. Nesta página são colocados os parâmetros de teste: objetivo do teste, modo de avaliação e outras observações do teste. Esta página é introdutória, os dados fornecidos servem para diferenciar os testes, de modo a facilitar uma futura localização do ensaio. O único valor importante nesta página é o modo de avaliação, escolhida entre uma análise por grupo ou regressão. Na regressão, a partir dos dados fornecidos de peças conhecidas, obtém-se valores em peças desconhecidas.

Na página 3 são determinados os parâmetros a serem utilizados pelo equipamento no ensaio. Nesta página pode-se escolher até 24 diferentes jogos de parâmetros a serem utilizados no equipamento. No final da calibração do equipamento, utilizando-se regressão, é escolhido somente um jogo de parâmetros para realização dos testes das peças com características desconhecidas, sendo todos os outros apagados. Quando não se tem idéia sobre os valores de parâmetros a serem utilizados, pode-se testar os parâmetros através do método de tentativa e erro.

Para cada parâmetro deve-se fornecer a bobina utilizada, o tipo de bobina, a frequência, o harmônico e a atenuação do campo. A tabela 5.6 mostra os valores possíveis que podem ser utilizados. A figura 5.9 é uma impressão da página 3, mostrando alguns dos parâmetros utilizados.

Tabela 5.6: Valores possíveis a serem utilizados nos parâmetros primários

Parâmetros	Valores possíveis
Bobina	C1 - Bobina da flange C2 - Bobina da haste C3 - Bobina da estria
Tipo de bobina	Bobina baixa frequência
Frequência	2, 4, 8, 16...128 000 Hz
Harmônico	f1, f3, f5 e f7
Atenuação do campo	0, 6, 12, 18, 24 e 30 dB

	Num.	Bobina	Frecuenci	Armonico	At.campo
J 1	N 3	Bobina-BF	128 Hz	f 1	0 dB
J 2	N 3	Bobina-BF	64 Hz	f 1	0 dB
J 3	N 3	Bobina-BF	32 Hz	f 1	0 dB
J 4	N 3	Bobina-BF	16 Hz	f 1	0 dB
J 5	N 3	Bobina-BF	8 Hz	f 1	0 dB
J 6	N 3	Bobina-BF	4 Hz	f 1	0 dB

Figura 5.9: Possível jogos de parâmetros a serem utilizados na página 3

Os valores utilizados na calibração foram harmônico f1, atenuação do campo igual a zero e foram utilizados as frequências entre 2 e 256 Hz. Estes 7 parâmetros pareceram ser os melhores após realização de testes. Mas, percebeu-se que a frequência de 2 Hz nunca obteve resultados positivos. Portanto, em algumas calibrações só foram utilizados 6 parâmetros.

Na página 3 para cada parâmetro primário, estão associados outros parâmetros secundários. Os parâmetros secundários são parte dos parâmetros do equipamento. Os parâmetros secundários são a corrente máxima da bobina e a sensibilidade. Estes valores podem ser inseridos manualmente ou automaticamente. Nas calibrações realizadas sempre foi feita automaticamente a obtenção de valores. A vantagem de trabalhar automaticamente é evitar a possibilidade de queimar a bobina, pois nesta calibração automática tem-se uma margem de segurança de pelo menos 15%.

Na página 4, como mostrado na figura 5.10, pode-se ver a amplitude do sinal da bobina na onda fundamental e nos harmônicos f3, f5 e f7 para cada frequência. A partir da observação das amplitudes dos sinais pode-se escolher um ou mais harmônicos para a realização dos testes. Quando se tem valores maiores que 1%, já se pode utilizar na calibração. Apesar que valores menores que 60% não apresentaram nunca um bom resultado. Caso se encontre um harmônico com uma alta porcentagem para uma certa frequência que não está sendo utilizado, pode-se voltar a página 3 e adicionar um novo parâmetro.

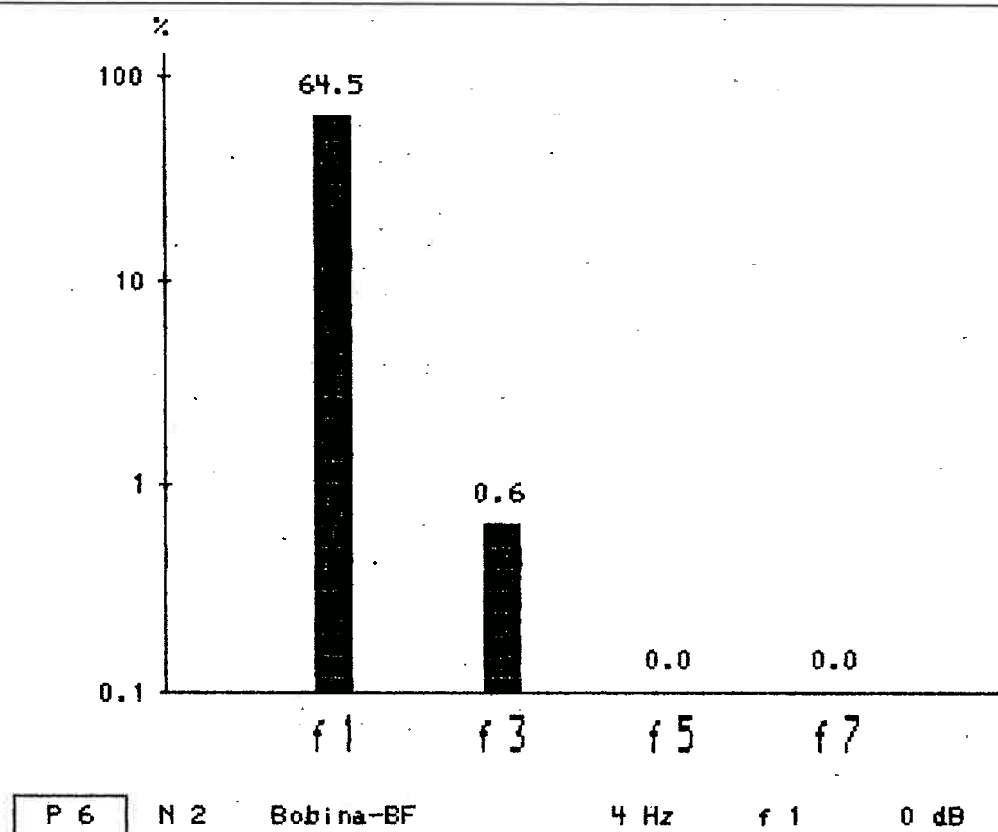


Figura 5.10: Amplitude dos harmônicos mostrado na página 4

Na página 5 altera-se para o modo de calibração. Para iniciar a calibração, primeiramente escolhe-se uma peça como referência. Esta peça tem como objetivo compensar mudanças como a variação de temperatura ou pré-magnetização de peças ferromagnéticas existentes, ao se realizar posteriormente o teste.

A peça é posicionada no dispositivo, na tela é mostrado o valor de impedância e o seu posicionamento no plano de impedância. O usuário fornece o valor encontrado no ensaio destrutivo, e o software faz um par de valores com o valor do plano de impedância e o valor do ensaio não destrutivo. Este procedimento é repetido para cada uma das outras sete peças.

Com o mínimo de 8 valores fornecidos, vai para a página 6 e faz-se uma regressão no plano de impedância. Na página 7 são mostrados os valores de correlação obtidos em cada parâmetro, como na figura 5.11. O valor com a maior correlação é escolhido para a realização de testes e os outros são apagados. Com o fim da calibração, pode-se testar peças com características desconhecidas.

Num.	Frecuenci	Armonico	At.campo	Correlacion	
J 1	N 2	128 Hz	f 1	0 dB	93.4 %
J 2	N 2	64 Hz	f 1	0 dB	96.5 %
J 3	N 2	32 Hz	f 1	0 dB	94.2 %
J 4	N 2	16 Hz	f 1	0 dB	98.3 %
J 5	N 2	8 Hz	f 1	0 dB	96.5 %
J 6	N 2	4 Hz	f 1	0 dB	96.6 %

Figura 5.11: Correlação obtida em ensaio

O teste da peça é feito carregando na página 5 a peça de referência. Se o valor da peça de referência no plano de impedância não for igual ao gravado na calibração faz-se a adaptação da peça. A adaptação consiste em aplicar um valor de correção na abcissa e na ordenada de modo que os dois valores seja iguais. Neste caso todas as peças que forem testadas sofrem esta correção de modo que as peças fiquem na mesma condição padrão realizada na calibração. A figura 5.12 mostra a regressão realizada no plano e o valor de algumas peças no plano de impedância.

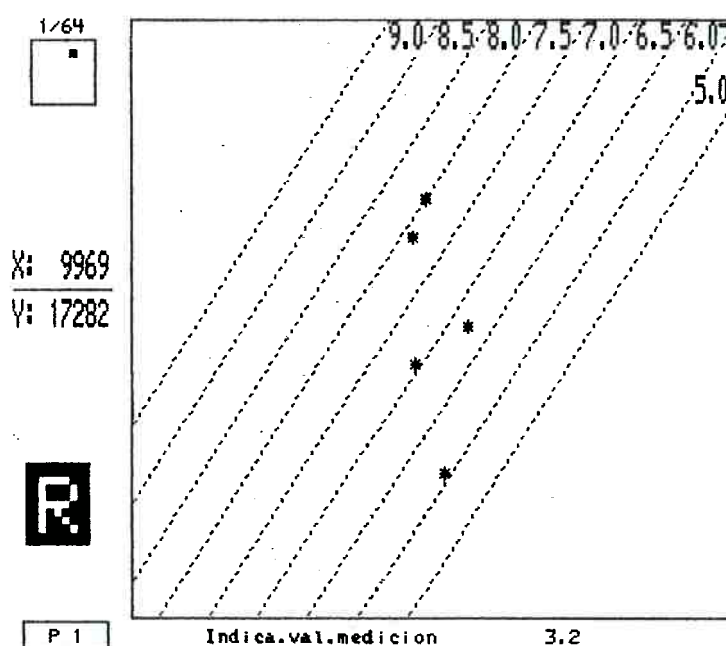


Figura 5.12: Regressão realizada no plano de impedância com valores de algumas peças

Na calibração das peças, quando se utiliza os valores obtidos nos ensaios destrutivos, nem sempre a correlação obtida é muito boa e consequentemente os resultados dos testes também não. Portanto, levando-se

em conta que a existência de uma variação no dimensional das peças, que tratamentos térmicos anteriores a indução não tenham sido completamente iguais. Pode-se existir uma variação entre o valor obtido no ensaio destrutivo e no ensaio não-destrutivo. Logo, para melhorar os resultados foi permitido fornecer valores na calibração para a realização na regressão com uma diferença em relação ao valor do ensaio destrutivo.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Foram feitas para cada parte do semi-eixo diferentes calibrações com diferentes valores nas medidas do semi-eixo e com diferentes parâmetros. Os semi-eixos foram testados nas diferentes calibrações e foram escolhidas as calibrações em que a diferença dos resultados entre os ensaios destrutivos e os não-destrutivos foi menor.

Na calibração da haste não houve muitos problemas para a obtenção de uma boa correlação entre os pontos no plano de impedância. Nesta calibração, nas diferentes frequências, sempre se obteve uma correlação maior que 90%. A tabela 6.1 mostra os parâmetros utilizados e a correlação obtida. A maior correlação melhor foi obtida com o parâmetro 4 que foi de 96,5%, e foi escolhida para testar as peças. A peça de referência utilizada foi a peça de número 1.

Tabela 6.1: Correlação obtida para os parâmetros na haste

Parâmetro	Frequência (Hz)	Correlação (%)	f1(%)	f3(%)	f5(%)	f7(%)
1	128	91,0	58,9	0,1	0,0	0,0
2	64	95,8	63,8	0,2	0,0	0,0
3	32	92,1	61,6	0,4	0,0	0,0
4	16	96,5	60,3	0,6	0,1	0,0
5	8	94,7	70,9	0,5	0,2	0,0
6	4	95,9	68,1	0,6	0,1	0,0
7	2	94,4	70,4	2,4	0,1	0,1

A tabela 6.2 mostra os valores fornecidos para cada peça para a obtenção das correlações.

Tabela 6.2: Valores fornecidos para obtenção de valores de correlação na haste

Nº da peça	Valor fornecido (mm)
1	7,3
2	6,6
3	6,2
4	8,5
5	6,4
6	8,7
7	6,7
8	6,8

Com esta calibração foram realizados alguns testes para comparação entre os ensaios destrutivos (ED) e os ensaios não-destrutivos (END). A tabela 6.3 mostra esta comparação, e a diferença entre os valores obtidos em cada um dos ensaios. Este valores foram plotados no gráfico da figura 6.1, sendo os valores dos ensaios destrutivos na abcisa e os valores dos ensaios não-destrutivos na ordenada.

Tabela 6.3: Comparação de valores entre os ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos

Teste	ED (mm)	END (mm)	Diferença (mm)
1	6,15	5,80	0,35
2	7,25	6,85	0,40
3	7,45	7,50	0,05
4	7,55	7,50	0,05
5	6,85	6,60	0,25
6	6,65	6,30	0,35
7	7,55	7,40	0,15

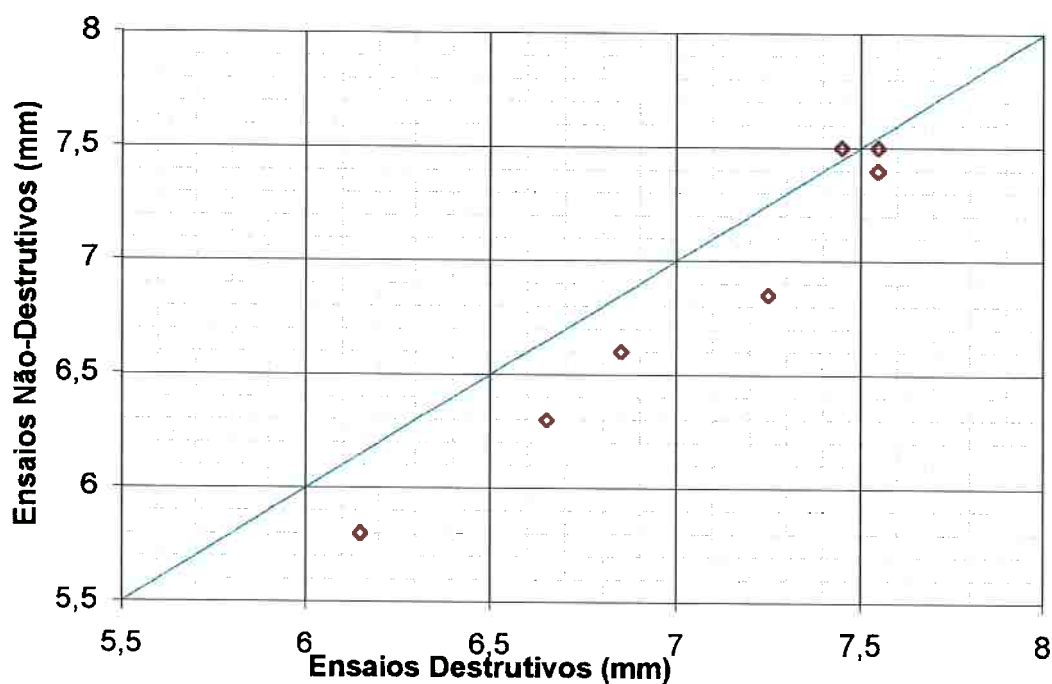


Figura 6.1: Comparação gráfica entre os ensaios realizados na haste

Na haste os valores obtidos foram considerados satisfatórios pois a maior diferença entre os ensaios destrutivos e os ensaios não-destrutivos foi de 0,40

mm. Os resultados foram bons porque a região da haste é muito homogênea, pois a profundidade de camada temperada próximo a região a testada, como em todo semi-eixo, é muito homogênea quase não existindo variações.

No raio da flange foi encontrado uma correlação boa quando se utilizado parâmetros com frequência maiores, entre os testados. A correlação não foi muito boa para todos os parâmetros, sendo que o único parâmetro que apresentou um valor de correlação razoável, maior do que 90%, foi o parâmetro 3 como mostrado na tabela 6.4. A peça de referência utilizada foi a peça de número 3.

Tabela 6.4: Correlação obtida para os parâmetros no raio da flange

Parâmetro	Frequência (Hz)	Correlação (%)	f1(%)	f3(%)	f5(%)	f7(%)
1	128	83,0	58,5	0,1	0,0	0,0
2	64	85,6	68,6	0,2	0,0	0,0
3	32	91,8	63,3	0,2	0,0	0,0
4	16	71,2	72,4	0,3	0,0	0,0
5	8	39,9	72,7	0,2	0,0	0,0
6	4	41,3	68,0	0,1	0,0	0,0
7	2	45,1	57,3	0,9	0,0	0,0

A tabela 6.5 mostra os valores fornecidos para a calibração do raio da flange. Utilizando-se o parâmetro 3 por ter obtido a melhor correlação, foram realizados ensaios e comparados com os ensaios não-destrutivos (tabela 6.6), e este valores foram plotados na figura 6.2.

Tabela 6.5: Valores fornecidos para obtenção de valores de correlação no raio da flange

Nº da peça	Valor fornecido (mm)
1	4,0
2	4,2
3	4,5
4	3,2
5	3,5
6	4,8
7	3,7
8	3,6

Tabela 6.6: Comparação entre os ensaios-destrutivos e não-destrutivos na região do raio da flange

Teste	ED (mm)	END (mm)	Diferença (mm)
1	5,05	4,90	0,15
2	4,70	4,65	0,05
3	4,75	4,85	0,10
4	4,65	4,60	0,05
5	5,40	4,80	0,60
6	4,20	4,20	0,00

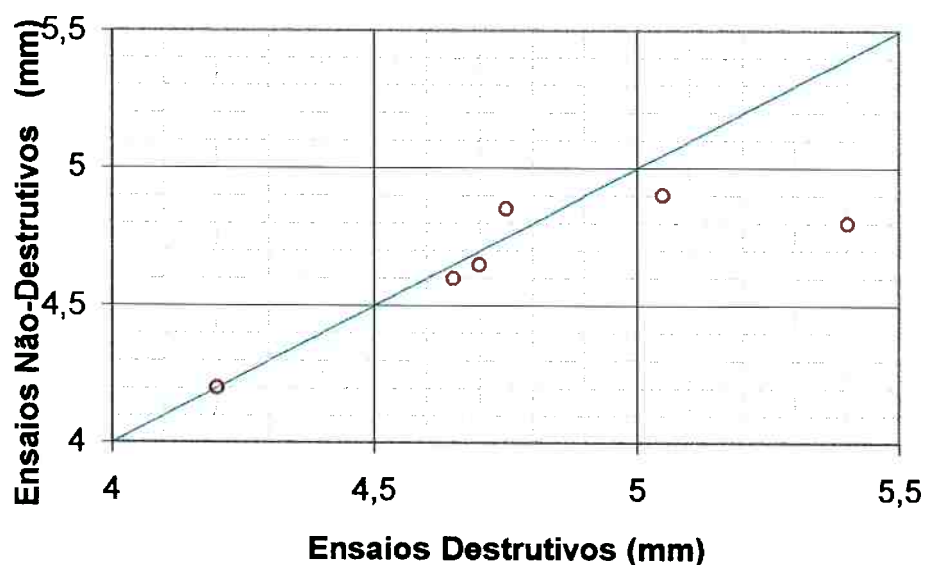


Figura 6.2: Comparação gráfica entre os ensaios realizados no raio da flange

Com os valores obtidos não se pode concluir que o resultado foi satisfatório no raio da flange. Primeiramente houve um resultado em que a diferença entre os ensaios foi de 0,6 mm. Este valor não foi considerado satisfatório. Porém o número de peças ensaiadas foi muito pequena, podendo ser que ao testar um grande número de peças, somente o valor desta fosse discrepante, e este valor fosse descartado.

No diâmetro da flange os parâmetros com maior correlação foram obtidos com os parâmetros de maior frequência, como mostrado na tabela 6.7. A correlação do parâmetro 1 foi de 95,1% que é muito boa. A tabela 6.8 mostra os valores fornecidos de peças para obtenção da correlação.

Tabela 6.7: Correlação obtida nos parâmetros para o diâmetro da flange

Parâmetro	Frequência (Hz)	Correlação(%)	f1(%)	f3(%)	f5(%)	f7(%)
1	128	95,1	58,5	0,0	0,0	0,0
2	64	92,0	68,5	0,2	0,0	0,0
3	32	86,1	62,4	0,2	0,0	0,0
4	16	62,2	72,4	0,3	0,0	0,0
5	8	0,0	72,8	0,2	0,0	0,0
6	4	0,0	68,3	0,2	0,0	0,0
7	2	48,5	57,7	1,0	0,0	0,0

Tabela 6.8: Valores fornecidos para obtenção de valores de correlação no diâmetro da flange

Nº da peça	Valor fornecido (mm)
1	73,5
2	73,8
3	74,3
4	70,0
5	72,5
6	75,0
7	73,3
8	72,8

Tabela 6.9: Comparação entre os ensaios destrutivos e não-destrutivos na região do diâmetro da flange

Teste	ED (mm)	END (mm)	Diferença (mm)
1	75,6	75,6	0,0
2	80,0	79,0	1,0
3	80,0	79,4	0,6
4	76,5	75,7	0,8
5	79,0	78,0	1,0
6	79,0	78,3	0,7

A tabela 6.9 mostra os resultados obtidos nos ensaios destrutivos e não-destrutivos e a sua diferença, estes valores estão plotados na figura 6.3. Os resultados mostram que a diferença entre as medidas é de 1,0 mm. Apesar da diferença ser alta entre os valores. Se comparado o valor da diferença entre os ensaios em relação ao intervalo das medidas em projeto, o valor encontrado é muito próximo do diâmetro em relação a haste.

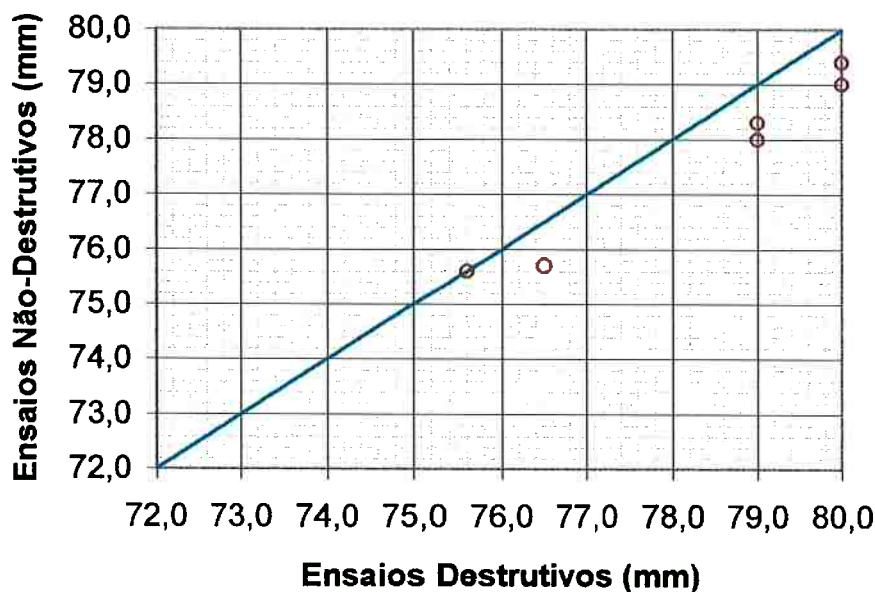


Figura 6.3: Comparação gráfica entre os ensaios realizados no diâmetro da flange

No diâmetro da flange os valores fornecidos para o equipamento são de uma ordem de grandeza maiores em relações a outras partes do semi-eixo. Portanto, quando se faz a regressão pequenas variações no sinal fazem com que as variações no resultado sejam maiores

A bobina que é utilizada na flange para o ensaio do raio e do diâmetro é o mesmo. Portanto, quando se está sendo realizada a calibração do raio o campo magnético gerado na bobina está criando correntes magnéticas em toda a flange. E o valor existente no diâmetro obviamente influencia este resultado. Logo os valores obtidos não são mais precisos porque não se obtém a influência de uma variável mas sim de todas as medidas existentes na flange.

A calibração na região estriada (saída) não foi satisfatória. Primeiramente foram utilizados somente seis peças ao invés de oito, o qual é o número mínimo de peças necessárias para a realização da regressão. Para isso as peças 3 e 6

foram utilizados duas vezes. As peças 4 e 7 não puderam ser utilizadas pois seus valores são negativos, já que o equipamento não aceita valores negativos.

Apesar da calibração ser feita com menor número peças, tem-se a vantagem de se obter uma correlação maior com um número menor de peças. Mesmo assim a correlação obtida foi muito baixa, (tabela 6.10) fazendo com que consequentemente os resultados fossem muito ruins. A tabela 6.11 mostra os valores fornecidos pelas peças para a obtenção das correlações. A peça utilizada como referência foi a de número 3.

Tabela 6.10: Correlação obtida nos parâmetros para a saída

Parâmetro	Frequência (Hz)	Correlação(%)	f1(%)	f3(%)	f5(%)	f7(%)
1	128	0,0	66,6	0,0	0,0	0,0
2	64	0,0	72,3	0,0	0,0	0,0
3	32	0,0	61,9	0,0	0,0	0,0
4	16	48,4	64,9	0,0	0,0	0,0
5	8	85,7	65,1	0,0	0,0	0,0
6	4	86,0	68,3	0,0	0,0	0,0

Tabela 6.11: Correlação obtida nos parâmetros para a saída da estria

Nº da peça	Valor fornecido (mm)
1	2,0
2	3,0
3	2,5 (2x)
4	-
5	0,1
6	7,0 (2x)
7	-
8	3,2

A correlação obtida foi muito baixa devido a alguns fatores principais. A variação da saída entre diferentes peças é muito pequena em comparação a outras variações que possam ocorrer na parte estriada. Por exemplo duas peças que tenham o mesmo valor de saída, mas com valores de profundidade de camada muito distantes nunca vão ter a mesma impedância. Para contornar este problema a peça foi posicionada de modo que a sua extremidade ficasse

próxima ao início da bobina. Este recurso tem como objetivo tornar a influência da profundidade de camada induzida a menor possível.

Mas, ao mesmo tempo, quanto menor a distância entre a extremidade da peça e a bobina, menor será a diferença no valor de impedância, dificultando a separação das peças. Além disso, como a variação da saída na peça em relação a estria é pouco significativa, uma pequena variação de usinagem pode fazer com que a variação da impedância seja maior do que a provocada pela variação da saída.

O fator de enchimento da bobina na região estriada é de 47%. Para a realização deste tipo de ensaio com variações muito pequenas seria interessante ter uma bobina com um fator de enchimento de pelo menos 81%.

A frequência em que se conseguiu obter os melhores parâmetros foi de 2 Hz, considerada baixa. Quando a frequência é muito baixa a sensibilidade aumenta, fazendo com que ocorram variações no valor da impedância a ser testado a bobina.

Na tabela 6.12 mostra a diferença de valores obtida entre os ensaios destrutivos e os ensaios não-destrutivos. Devido aos fatores mencionados anteriormente, a diferença entre os valores foi muito discrepante, mostrando não ser possível, com o equipamento utilizado, aplicar este ensaio.

Tabela 6.12: Comparação entre os ensaios destrutivos e não-destrutivos na região da saída da estria

Teste	ED (mm)	END (mm)	Diferença
1	4,00	1,85	2,15
2	3,00	3,20	0,20
3	2,40	4,60	2,20
4	6,15	4,25	1,9
5	0,00	1,80	1,80
6	1,60	1,90	0,30
7	1,75	3,50	1,75

7. CONCLUSÕES

- Na haste é possível trabalhar com uma confiança de até 0,4 mm, valor este considerado satisfatório.
- No raio da flange é possível trabalhar com uma confiança de até 0,6 mm. Neste caso é necessária a realização de um número maior de ensaios para constatar o real valor deste número.
- No diâmetro da flange é possível trabalhar com uma confiança de até 1,0 mm. Apesar do resultado não ser ótimo, pode-se utilizar a calibração do diâmetro levando-se em conta este valor nos resultados.
- Na saída não foi possível realizar uma boa calibração, fazendo que os resultados fossem totalmente insatisfatórios.
- Uma sugestão para a saída é a utilização de uma bobina com uma fator de preenchimento maior, de pelo menos 80%.
- Para o equipamento ser utilizado na produção, serão necessários ajustes de modo a melhorar o intervalo de confiança.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NORMA ABNT01.014 - NBR 8859. **Correntes Parasitas (Eddy Current) - Terminologia**. ABNT. Maio, 1985
- (2) LEITE, P. G. de P., **Ensaaios Não Destrutivos**. 10ª ed. ABM. São Paulo, 1979, pág. 1.1 a 1.9
- (3) EDDY CURRENT INSPECTION. IN: Metals Handbook. Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM, Metals Park, 9ª ed., vol. 17, pág. 164 - 201,
- (4) SPOERER, A. - **Curso de Correntes Parasitas** - Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos. Curso realizado entre os dias 9/4 e 13/4 de 1995 - pág. 1 a 34 - São Paulo 1995
- (5) **Introduction To Eddy Current Technology**. [http\www.hocking.com/tekintro](http://www.hocking.com/tekintro)
- (6) NEPOMUCENO, L. X. **Classroom Training Handbook -Eddy Current Testing**, NASA CR 61230, Cap. 1,2 e 3, Agosto 1965
- (7) **Inspecção Por Correntes Parasitas** 1ª Seminário Internacional de Tecnologia de Aquecimento por Indução, pág. 1-5, Março 1995 - São Paulo - Brasil
- (8) STEGEMANN, D. **Fundamentos do Método de Correntes Parasitas**. Forschungszentrum Jülich GmbH, pág. 23 - 81, 1990
- (9) SPOERER, A. - **Regional Training Course On Industrial Applications Of Non Destructive** - Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos - Correntes Parasitas, pág. 1 -23, 1993
- (10)CALLISTER Jr., W. D. **Materials Science And Engineering An Introduction**, Wiley International Editions, 3ª ed., cap. 21, pág. 659-684, 1994
- (11)RIDDER, J. H. Eddy Current Applications, IN: Fundamentals of Nondestructive Testing - Home Study and Extension Courses presented by The American Society for Metal and The American Society for Nondestructive Testing, cap. 11, pág. 11-1 a 11-23,
- (12)SEMATIN, S. L.; STUTZ, D. T. **Induction Heat Treatment of Steel**. ASM, pág. 1-5, 1991

(13)CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 6^a ed. Associação Brasileira de Metais, pág. 105, 109-113, 1988

(14)STEVENS, N., **Induction Hardening and Tempering**, IN: Metals Handbook, Heat Treating, 9^a ed., v.4, pág. 451-484 , 1981