

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais
PPGEM

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE TRANSDUTORES MAGNÉTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE CEMENTAÇÃO EM LIGAS HP40

CLÁUDIO FERRETTI

Licenciado em Física

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2002

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais
PPGEM

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE TRANSDUTORES MAGNÉTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE CEMENTAÇÃO EM LIGAS HP40

CLÁUDIO FERRETTI

Licenciado em Física

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Ciência dos Materiais.

Porto Alegre

2002

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração: Ciência dos Materiais, aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly
Co-orientador: Prof. Dr. Renato Machado de Brito

Banca Examinadora

1. Prof. Dr. Carlos Eduardo Fontis Kwietniewski
2. Prof. Dr. Milton Zaro
3. Prof. Dr. Joyson Pacheco

Coordenador do PPGEM: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Renato Machado Brito que mesmo assumindo a diretoria da Escola de Engenharia continuou prestando sua inestimável cooperação na elaboração desta tese.

Ao Prof. Dr. Milton Zaro pela orientação acadêmica, dedicação e amizade que tornou possível o caminho ao mestrado.

Ao Prof. Dr. Afonso Reguly por toda sua dedicada orientação na elaboração do conjunto da tese, podendo-se contar sempre com sua ajuda.

Ao Prof. Dr. Aly Ferreira Flores Jr. pela orientação na abordagem do problema, principalmente no que se refere à distância de entreferos e linealização das funções de transferência.

Ao Prof. Dr. Temo Strohaecker pelo apoio na parte experimental, viabilizando a execução dos protótipos, sugerindo métodos de tratamento térmico das amostras HP40.

Aos meus pais que mesmo morando em outro estado, sempre foram estímulo para a conclusão deste trabalho.

A todos os integrantes do Lamef (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS) e do I.E.E. (Instituto de Engenharia Elétrica da UFRGS) que tanto colaboraram na coleta de dados e elaboração dos indutores.

Ao Alexandre Soares Stephan pelas horas despendidas em experimentos práticos que conduziram ao domínio dos indutores ensaiados.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro

Por fim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a conclusão com este trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	III
SUMÁRIO	IV
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
RESUMO	XV
ABSTRACT.....	XVI
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Apresentação.....	1
1.2. Justificativa	2
1.3. Objetivos:.....	5
1.4. Estrutura do Trabalho	6
1.5. Metodologia Utilizada	6
1.6. Limitações do Presente Trabalho.....	7
1.7. Motivação	7
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Transdutores.....	8
2.1.1. Definição	8
2.1.2. Transdutor	8
2.1.3. Transdutores Simples e Compostos	9
2.1.4. Transdutor Ativo e Passivo	10
2.1.5. Função Transferência e Sensibilidade.....	11
2.1.6. Princípio Físico de Operação de um Transdutor Indutivo	12
2.1.7. Sistema de Medição	13
2.1.8. Calibração	14

2.1.9. Análise de Curva de Calibração.....	14
2.2. Teoria dos Erros.....	17
2.2.1. Valor Numérico, Indeterminação e Unidade.	17
2.2.2. Erro: Indeterminação Calculável.....	17
2.2.3. Incerteza: Indeterminação Estimada	17
2.2.4. Desvio: Indeterminação Estatística.....	17
2.3. Propagação de Incerteza	18
2.4. Contribuição do Sistema de Medida na Indeterminação Final da Medida	19
2.5. Análise de Circuito Magnético	19
2.6. Primeira Proposta Para Investigar a Relação entre Intensidade de Corrente (I) e Espessura de Entreferro (g(x))	25
2.7. Considerações Sobre o Campo Disperso	29
2.8. Segunda Proposta Para Investigar a Relação Entre Intensidade de Corrente (I) e Espessura de Entreferro (g(x))	30
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODO.....	32
3.1. Estrutura Geral.....	32
3.2. Construção de Transdutores.....	33
3.2.1. Interação Força Magnética e Amostras.....	33
3.2.2. Gabarito de Espessura de Entreferro.....	33
3.2.3. Régua Instrumentada.....	35
3.2.4. Régua Instrumentada sobre o Gabarito	35
3.2.5. Transdutor Magnético 01	36
3.2.6. Transdutor Magnético 02	38
3.2.7. Transdutor Magnético 02 sobre o Gabarito	39
3.2.8. Transdutor Magnético 03	40
3.2.9. Mapeamento do Tubo HP40	40
3.2.10. Estudo da Dispersão do Campo Magnético nos T.M. de 04 a 12	42
3.2.11. Transdutor Magnético 13	43
3.2.12. Transdutor Kubota	44

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1. Caracterização das Espécies Inspeccionadas.....	45
4.1.1. Liga da Classe HP40	45
4.2. Transdutor Magnético 01	50
4.2.1. Equilíbrio de Forças no Momento da Medição.....	52
4.2.2. Régua Instrumentada.....	52
4.2.3. Comportamento da Amostra	55
4.2.4. Transdutor Magnético 01	56
4.2.5. Comparação entre Régua Instrumentada e Transdutor Magnético 01	59
4.2.6. Análise do Transdutor Magnético 01	60
4.3. Transdutor Magnético 02.....	62
4.4. Transdutor Magnético 03.....	64
4.4.1. Análise da Linearidade Entre Corrente Elétrica no Primário e Espessura de Entreferro.....	66
4.4.2. Inspeção de Tubo Classe HP40.....	68
4.5. Estudo do Campo Magnético Através da Geometria e dos Transdutores	71
4.5.1. Análise dos Transdutores 04 a 11	73
4.6. Transdutor Magnético 12 (Transdutor Magnético 07 com Fina Camada Metálica).....	73
4.7. Transdutor Magnético 13	75
4.8. Análise de Amostras Cementadas.....	81
4.9. Transdutor Kubota	86
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO.....	91
CAPÍTULO 6: SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	92
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFIA.....	94
CAPÍTULO 8: APÊNDICES:.....	99
8.1. Apêndice 01: NACE - TM0498-98 - Métodos Padronizados Para Mensuração de Cementação em Ligas Usadas Para Cracking de Etileno em Tubos de Alto Forno.	99
8.2. Apêndice 02: Estudo do Campo Magnético Através da Geometria e dos Transdutores	106

8.2.1. Transdutor Magnético 04	106
8.2.2. Transdutor Magnético 05	107
8.2.3. Transdutor Magnético 06	107
8.2.4. Transdutor Magnético 07	108
8.2.5. Transdutor Magnético 08	108
8.2.6. Transdutor Magnético 09	109
8.2.7. Transdutor Magnético 10	110
8.2.8. Transdutor Magnético 11	111
8.3. Apêndice 03: Tabelas de Resultados	112
8.3.1. Valores de Voltagem do Transdutor 03 no Tubo HP40.....	112
8.3.2. Determinação do Número de Espiras do Indutor.....	113
8.3.3. Voltagem e corrente para o T.M. 02 sobre o gabarito.	116
8.3.4. Valores de Voltagem e Corrente para o T.M. 03 sobre o gabarito.	117
8.3.5. Valores de Corrente para o T.M. 03 Modificado (Apenas com Primário) Sobre o Gabarito.	118
8.3.6. Alteração da Faixa de Frequência de Maior Sensibilidade do T.M.03.....	118
8.3.7. Valores de Voltagem Baixa e Alta Sensibilidade no T.M. 13.	120
8.4. Apêndice 04: Materiais Magnéticos	121
8.4.1. Magnetismo.....	121
8.4.2. Ferromagnetismo	124
8.5. Apêndice 03: Conceitos de Eletromecânica	129
8.5.1. Fluxo Magnético	129
8.5.2. Densidade de Fluxo Magnético.....	129
8.5.3. Permeabilidade Magnética	129
8.5.4. Força Magnetomotriz.....	130
8.5.5. Intensidade de Campo Magnético.....	130
8.5.6. Circuitos Magnéticos	130
8.5.7. Relutância \mathfrak{R}	131

8.5.8. Lei de Ohm para os Circuitos Magnéticos.....	131
8.5.9. Lei de Faraday da Voltagem Induzida	131
8.5.10. Indução Eletromagnética.....	132
8.5.11. Perdas no Núcleo da Bobina	132
8.5.12. Força Magnética na Bobina	132
8.6. Apêndice 06: Circuito LR em Série.....	134
8.6.1. Análise Simples.....	134
8.6.2. Método Mais Rigoroso.....	138
8.7. Apêndice 05: Esquema Eletrônico do Condicionador de Sinais do S.M. 13.....	140

LISTA DE FIGURAS

FIG. 1: Tubo HP40 (a) recebido de fabrica e (b) após a passivação	2
FIG. 2: Tubo HP40 com (a) formação de coque e aquecimento da superfície externa, (b) rompimento da camada de óxido por variação térmica e (c) cementação após a primeira remoção de coque	3
FIG. 3: Tensões internas provenientes do gradiente térmico no momento da remoção do coque.	3
FIG. 4: Metalografia (a) de um tubo novo e (b) com 37.000 horas de uso	4
FIG. 5: Representação esquemática de um transdutor. Um estímulo G na entrada é convertido em uma resposta O na saída.	8
FIG. 6: Transdutor simples. Só existe um estágio de transdução entre a entrada e a saída: $O=S_A G$	9
FIG. 7: Transdutor composto. Existem neste exemplo três estágios perfazendo-se três transduções distintas: $O = S_A.G$, $R = S_B.O$, $E = S_C.R$	10
FIG. 8: Diagrama de um transdutor passivo. A resposta O é proporcional ao estímulo G, sendo $O = f(G,E)$ ou seja, O depende de G e também do nível de excitação E	10
FIG. 9: Representação gráfica de uma função transferência. A sensibilidade é o valor numérico desta função. Para o ponto a tem-se $o = s.g$ onde s é a sensibilidade no mesmo ponto.	11
FIG. 10: Esquema geral de um sistema de medição.....	13
FIG. 11: Diagrama de blocos de um sistema complexo de medições.	13
FIG. 12: Curva de calibração de um transdutor. A = resposta para estímulo nulo. B= valor limite do estímulo aplicado a entrada. D = valor limite da resposta para o estímulo limite.....	15
FIG. 13: (a)Estrutura magnética de núcleo de ferro e bobina indutora. (b) Diagrama esquemático da estrutura. (c) Circuito magnético do sistema.	21
FIG. 14: (a) Estrutura magnética de um sistema com aberturas (entreferos). (b) Diagrama esquemático da estrutura. (c) Circuito magnético do sistema.....	22
FIG. 15: Continuidade das linhas de fluxo em uma junção na estrutura magnética.	24
FIG. 16: Indutor passivo sobre o gabarito em vista lateral.....	25
FIG. 17: Circuito LR contendo resistência (r_1) e indutância externas (L_1) ao transdutor ..	25
FIG. 18: Circuito magnético simplificado do sistema de inspeção com dois entreferos ...	26
FIG. 19: Circuito magnético simplificado do sistema de inspeção de três entreferos	28
FIG. 20: Circuito magnético simplificado do sistema contendo fluxo magnético disperso	29
FIG. 21: Circuito tipo ponte de Wheatstone formado por dois resistores e dois indutores.	30
FIG. 22: Diagrama esquemático deste trabalho.....	32
FIG. 23: Desenho do gabarito em duas cunhas justapostas.....	34
FIG. 24: Referencial sobre o gabarito	34
FIG. 25: (a) Esquema de um circuito em meia ponte para extensores Ex_2 e Ex_4 ; (b) Régua instrumentada. No detalhe, observa-se o posicionamento dos extensores.....	35
FIG. 26: Calibração da régua instrumentada com o auxílio de uma mesa ajustável pantográfica.	36
FIG. 27: Construção da estrutura de sustentação da haste e posicionamento do ímã	36
FIG. 28: Calibração do Transdutor 01 com pesos aferidos	37
FIG. 29: Transdutor Magnético 01 sobre o gabarito em cunha.....	37

FIG. 30: Montagem do Transdutor 02 a partir de um transformador comercial.....	38
FIG. 31: Transdutor Magnético 02 sobre o gabarito em cunha.....	39
FIG. 32: Montagem do Transdutor Magnético 03 com dois entreferros.....	40
FIG. 33: Sistema de coordenadas adotados para o mapeamento da superfície do tubo.....	40
FIG. 34: Transdutor Magnético 03 no suporte de inspeção de tubos.....	41
FIG. 35: Orientação do transdutor sobre o tubo (a) Sentido paralelo (b) Sentido Transversal.....	41
FIG. 36: Estudo do campo disperso nos transdutores através de sua geometria.....	42
FIG. 37: Transdutor Magnético 13: ponte de Wheatstone e condicionador de sinais.....	43
FIG. 38 Transdutor Magnético 13 com simetria axial em relação à bobina.....	44
FIG. 39: Representação do Transdutor Kubota.....	44
FIG. 40: Amostra nova. Caracterização microestrutural em microscopia eletrônica de varredura, e microanálise em microsonda EDS das respectivas regiões. Em (a) uma caracterização geral e em (b) dos precipitados interdendríticos.....	45
FIG. 41: Caracterização de uma amostra que operou aproximadamente 37.000 horas. Presença de diferentes precipitados. Sem ataque.....	47
FIG. 42: Caracterização da microestrutural da (a) região interna do tubo e da (b) região externa, sem ataque. (c) e (d) região interna do tubo com ataque de solução de picrato.....	Erro! Indicador não definido.
FIG. 43: (a) Ensaio com partícula magnética empregado sobre seção transversal de tubo HP40 (b) Diagrama esquemático reproduzido em papel vegetal.....	48
FIG. 44: (a) Diagrama de cementação conseguido por ataque químico sobre carbetto. Os círculos evidenciam difusão de carbono para o interior da matriz pelo rompimento do óxido protetor. (b) Diagrama esquemático evidenciando resultados de ensaio por partícula magnética sobreposto à técnica de ataque químico sobre carbetto..	49
FIG. 45: Partícula magnética depositada diretamente sobre a peça já atacada quimicamente.....	49
FIG. 46: Oscilação de voltagem na bobina do alto falante quando sujeita a massa de.....	51
FIG. 47: Valores máximos de voltagem em função do tempo para um carregamento de (a) 15 gramas e (b) 26 gramas.....	51
FIG. 48: Quando as forças magnéticas são intensas, (a) as forças de restituição são, relativamente, desprezíveis. Porém quando fracas, (b) as forças de restituição são semelhantes, interferindo nas medidas.....	52
FIG. 49: Calibração da régua instrumentada com pesos aferidos.....	53
FIG. 50: Voltagem no condicionador de sinais sobre o gabarito em cunha.....	55
FIG. 51: Gráficos (a) peso sobre o cone do alto falante e a voltagem necessária para retornar a posição inicial (b) pesos sobre o cone e a corrente necessária para retornar a posição inicial.....	57
FIG. 52: Gráfico de voltagem e corrente elétrica em função da espessura de entreferro para o Transdutor Magnético 01.....	58
FIG. 53: Gráficos de voltagem e corrente em função da espessura de entreferro para o Transdutor Magnético 01 com o dobro de massa magnética.....	61
FIG. 54: Transformador com enrolamento primário seccionado de A a H e secundário 1-2.....	62
FIG. 55: Gráfico de corrente versus frequência utilizada pelo T.M. 02 sobre o gabarito.....	63
FIG. 56: Gráfico de voltagem versus frequência utilizada pelo T.M. 02 sobre o gabarito.....	63
FIG. 57: Transdutor Magnético 03 com dois entreferros.....	65
FIG. 58: Gráfico de voltagem em função da frequência para o Transdutor Magnético 03.....	65
FIG. 59: Gráfico de corrente em função da frequência para o Transdutor Magnético 03.....	66
FIG. 60: Gráfico do Transdutor Magnético 03 Modificado para a frequência de 500 Hz.....	67

FIG. 61: Gráfico do Transdutor Magnético 03 Modificado para a frequência de 700 Hz..	67
FIG. 62: Referências sobre a superfície do tubo	69
FIG. 63: Transdutor Magnético 03 no (a) Sentido Paralelo e (b) Sentido Transversal.....	70
FIG. 64: Gráfico em barras dos valores de voltagem lidos pelo Transdutor Magnético 03 em função das posições longitudinais e circunferenciais no tubo cementado em campo	71
FIG. 65: Perfil de cementação de uma seção transversal de tubo classe HP40.....	71
FIG. 66: Inspeção com o Transdutor Magnético12 tendo uma lâmina metálica nos entreferos.....	73
FIG. 67: Gráfico de corrente obtida com e sem lâmina de ferro-silício no T. M. 12.....	74
FIG. 68: Transdutor Magnético 13: ponte de Wheatstone e condicionador de sinais.....	75
FIG. 69: Transdutor Magnético 13 com calços de EVA	76
FIG. 70: Transdutor Magnético 13 sobre o gabarito no sentido 1 e 2.....	76
FIG. 71: Transdutor Magnético 13 sobre o gabarito no sentido paralelo e transversal.....	77
FIG. 72: Gráfico de voltagem versus espessura de entreferro para o T.M. 13.....	78
FIG. 73: Gráfico de barras correspondente a (a) baixa e (b) alta sensibilidade no condicionador de sinais do Transdutor Magnético 13.....	79
FIG. 74: Gráfico em barras da cementação ocorrida em tubo de 37.000 horas de trabalho lida pelos (a) Transdutor Magnético 03 e (b) Transdutor Magnético 13	79
FIG. 75: Diagrama de cementação encontrado nas seções transversais das posições longitudinais (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04 e (e) 05.....	81
FIG. 76: Padrão de cementação adotado para calibração dos sensores.....	82
FIG. 77: Sobreposição dos perfis de cementação T.M.13 e os de pó magnético.....	83
FIG. 78: (a) Região interna do tubo HP40 com poucas falhas na camada de óxido e (b) outra região fortemente atacada. Superficialmente apresentam semelhança de cementação.	84
FIG. 79:Indicação das diversas camadas lidas nas colunas da tabela	85
FIG. 80: (a) Camada 05 antes da remoção da região cementada (b) Camada 05 após a remoção da região cementada e com valores de voltagem corrigidos	85
FIG. 81: Transdutor Kubota com (a) placas metálicas padrão e (b) a provável constituição interna.....	86
FIG. 82: Posicionamento do Transdutor Kubota sobre o gabarito em cunha.....	87
FIG. 83: Valores numéricos de porcentagem de cementação versus espessura de entreferro para o Transdutor Kubota.....	88
FIG. 84: Gráfico de porcentagem de cementação versus Espessura de Entreferro para o Transdutor Kubota.....	90
FIG. 85: Transdutor Magnético Cilíndrico, capaz de concentrar as linhas de indução magnética para a superfície de análise.	92
FIG. 86: Cunha duplo acrílico com lâmina metálica interna.....	93
FIG. 87: (a) Uma resposta de linhas magnéticas irregulares em tubos da série HP45 e similares (b) Uma resposta de linhas magnéticas regular em tubos da série HP45 e similares.....	101
FIG. 88: Seções de um tubo HP40 atacado com áreas cementadas, reveladas por método químico.....	103
FIG. 89: Transdutor Magnético 04.....	106
FIG. 90: Transdutor Magnético 05.....	107
FIG. 91: Transdutor Magnético 06.....	107
FIG. 92: Transdutor Magnético 07.....	108
FIG. 93: Transdutor Magnético 08.....	108
FIG. 94: Transdutor Magnético 09.....	109

FIG. 95: Transdutor Magnético 10.....	110
FIG. 96: Transdutor Magnético 11.....	111
FIG. 97: Transformador com enrolamento de 10 espiras.....	113
FIG. 98: Esquema eletrônico LR.....	114
FIG. 99: Exemplo de aplicação para majorar o valor da célula C2.....	118
FIG. 100: Linhas de campo magnético geradas ao redor de uma espira circular.....	121
FIG. 101: Dipolo Natural.....	121
FIG. 102: Comparação entre diamagnetismo e paramagnetismo gráfico de indução B versus campo de força magnética H.....	124
FIG. 103: Um grande aumento ocorre em B durante a magnetização inicial (linha pontilhada). A indução encontra a saturação (B_S) uma vez aplicado campo suficiente. Muito daquele campo é retido quando se remove o campo ($B_R =$ indução remanescente). Um campo coercitivo (H_C) é requerido para reduzir a indução a zero.....	124
FIG. 104: Estrutura eletrônica dos orbitais 3d para metais de transição. Elétrons desemparelhados contribuem para a natureza magnética destes metais.....	126
FIG. 105: O alinhamento dos domínios magnéticos para átomos adjacentes conduz a um grande momento magnético efetivo., como no caso do ferro ccc à temperatura ambiente.....	127
FIG. 106: No domínio, ou bloco, a parede é uma estreita região no qual o momento atômico muda de orientação em 180° . O movimento da parede envolve somente a mudança de orientação da região. Nenhuma migração de átomos é requerida..	128
FIG. 107: Representação da microestrutura dos domínios no percurso da curva de histerese ferromagnética.....	128
FIG. 108: Esquema de um Circuito LR.....	134
FIG. 109: Relação entre Impedância, Reatância e Ângulo de Fase do Circuito.....	135
FIG. 110: Representação gráfica da corrente, voltagem total, no resistor e no indutor	136
FIG. 111: Esquema de circuito RL.....	138
FIG. 112: Esquema Eletrônico do Condicionador de Sinais (LVDT) do Transdutor Magnético 13.....	140

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Composição química (% em peso) da liga.....	45
TABELA 2: Variação máxima e mínima de voltagem nos terminais da bobina ao ser acionada.....	50
TABELA 3: Valores de peso x voltagem na régua instrumentada.....	53
TABELA 4: Valores de voltagem no condicionador de sinais em função da distância sobre o gabarito.....	55
TABELA 5: Valores de voltagem e corrente x peso para o Transdutor Magnético 01	56
TABELA 6: Valores voltagem e corrente obtidos sobre o gabarito com o Transdutor Magnético 01.....	58
TABELA 7: Valores força em função da distância sobre o gabarito para 10 g de massa magnética no T.M.01.....	59
TABELA 8: Valores força em função da distância sobre o gabarito para 26 g de massa magnética no T.M.01.....	59
TABELA 9: Comparação entre força lida pela régua instrumentada e o Transdutor Magnético 01.....	59
TABELA 10: Voltagem do Transdutor Magnético 03 sobre tubo HP40 no sentido transversal.....	70
TABELA 11: Resumo de todos os transdutores e suas respectivas sensibilidades.....	72
TABELA 12: Voltagem e corrente no Transdutor Magnético 12 sobre placa de ferro silício nos entrefeitos.....	74
TABELA 13: Transdutor Magnético 13 sobre o gabarito em cunha.....	77
TABELA 14: Inspeção realizada pelo Transdutor Magnético 13 em tubo HP40 sem camada cementada retirada com auxílio de torno.....	85
TABELA 15: Valores numéricos obtidos pelo Transdutor Kubota sobre o gabarito.....	87
TABELA 16: Porcentagem real e teórica para o Transdutor. Kubota em ABNT 1030.....	88
TABELA 17: Ajuste entre Transdutor Magnético 13 e Transdutor Kubota.....	89
TABELA 18: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 04.....	106
TABELA 19: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 05.....	107
TABELA 20: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 06.....	107
TABELA 21: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 07.....	108
TABELA 22: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 08.....	108
TABELA 23: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 09.....	109
TABELA 24: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 10.....	110
TABELA 25: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 11.....	111
TABELA 26: Voltagem do Transdutor Magnético 03 no tubo HP40.....	112
TABELA 27: Número de espiras do Transdutor Magnético 02 obtido por indução externa.....	113
TABELA 28: Valores de indutância de cada trecho do indutor do Transdutor Magnético 02.....	115
TABELA 29: Voltagem no Transdutor Magnético 02 sobre o gabarito.....	116
TABELA 30: Corrente no Transdutor Magnético 02 sobre o gabarito.....	116
TABELA 31: Voltagem no Transdutor Magnético 03 sobre o gabarito.....	117
TABELA 32: Corrente no Transdutor Magnético 03 sobre o gabarito.....	117
TABELA 33: Corrente do Transdutor Magnético 03 com apenas enrolamento primário.....	118

TABELA 34: Corrente (modificada) no Transdutor Magnético 03 com apenas enrolamento primário	119
TABELA 35: Voltagem (mV) no conversor de sinais no Transdutor Magnético 13 com alta sensibilidade	120
TABELA 36: Voltagem (mV) no conversor de sinais no Transdutor Magnético 13 com baixa sensibilidade	120

RESUMO

Ligas da classe HP40 e similares são empregados em ambientes petroquímicos onde a agressividade do meio provém da atividade do carbono a altas temperaturas. Normalmente a pirólise de metano, etileno ou nafta apresentam como subproduto formação de carbono na forma de coque. Com a elevação de temperatura local, ocasionada pela baixa condutividade térmica do coque, a camada de óxido de cromo interna torna-se instável, eliminando a barreira à difusão de carbono. O carbeto de cromo criado pela difusão de carbono apresenta dilatação térmica diferente da matriz causando tensões internas que em caso extremo ocasiona o rompimento do tubo. Este rompimento pode comprometer a atividade do forno e a segurança da unidade petroquímica..

Neste trabalho foram criados transdutores magnéticos capazes de medir espessura de camada cementada. A determinação da porcentagem de material cementado, através de instrumentos precisos é primordial ao planejamento da manutenção e estudo de custo-benefício à substituição destes materiais. Sua confecção visou empregar materiais de baixo custo, facilidade de manuseio e adequação ao ambiente petroquímico.

ABSTRACT

Austenitic HP40 alloy and its similars used in petrochemical environments are subject to carbon attack at high temperatures. Usually the thermal cracking of hydrocarbons is accompanied by coke formation on the furnace tube walls. The coke adheres to the walls and inhibits heat transfer from the burners to the gas mixture. In order to compensate the lower thermal conductivity it is necessary to increase the external tube wall temperature. The coke deposition also causes a reduction of the tube inner diameter, causing a higher-pressure drop. This necessitates a higher inlet pressure, which is disadvantageous for the ethylene production. With the local rise in temperature, caused by the low thermal conductivity of the coke, internal chromium oxide layer becomes unstable, eliminating the barrier to the carbon diffusion. Chromium carbides formed during the carbon diffusion have a different thermal dilatation behavior, causing internal tensions that in extreme cases could lead to tube rupture. This failure compromises the functionality of the furnace which could result in safety problems of the petrochemical unit.

In this work magnetic transducers had been created to measure thickness of carburized layer. The determination of the percentage of carburized material, through necessary instruments is primordial to the planning of the maintenance and study of cost-benefit of the substitution of these materials. The design of the sensor aimed the use of low cost materials, easy of use and adequacy to the petrochemical environment.

Capítulo 1: Introdução

1.1. Apresentação

Tubos fabricados em liga da família HP40 e similares apresentam grande estabilidade em altas temperaturas quando atacados por carbono. Quando utilizados na pirólise de hidrocarbonetos, o acúmulo de coque nas paredes internas provoca cementação da matriz, tornando o material frágil, comprometendo a operação dos fornos de aquecimento.

A determinação da porcentagem de material cementado permite racionalizar os tempos de parada para manutenção dos fornos, podendo-se estudar os mecanismos necessários para atingir uma situação econômica ideal. A construção de instrumentos de medida de baixo custo e boa precisão acompanharia este processo, propiciando rapidez e facilidade na obtenção dos dados. Esta determinação pode ser feita através das propriedades magnéticas do carbetto, uma vez que a matriz de estrutura austenítica não apresenta propriedades magnéticas. Transdutores magnéticos de distância são bons instrumentos para tal análise.

Apesar dos instrumentos criados neste trabalho estarem abertos a qualquer tipo de análise onde o parâmetro de medida seja a alteração magnética, foi dado um enfoque especial à confecção de transdutores magnéticos capazes de medirem, de forma não destrutiva, a porcentagem de material cementado em uma amostra de tubo HP 40.

A comparação dos instrumentos criados com os existentes no mercado estabelece parâmetros de aplicação dos transdutores, podendo-se comparar suas precisões e avaliar a adequação ao ambiente petroquímico.

1.2. Justificativa

A inspeção de tubos HP 40 é de difícil execução por análises convencionais em virtude da pequena diferenciação existente entre as regiões cementadas e a matriz. Constituído de uma liga de estrutura austenítica de níquel e cromo, mantém suas propriedades mecânicas graças ao processo de fabricação (fundição centrífuga, onde a estrutura externa do tubo apresenta grãos colunares enquanto a interna equiaxiais). Tratado por processos de passivação antes de entrar em operação (atmosfera oxidante de vapor de água e oxigênio), camadas de óxido de cromo, impermeável ao carbono protegem as paredes internas do tubo. A FIG. 1a e FIG. 1b mostra a alteração do tubo.

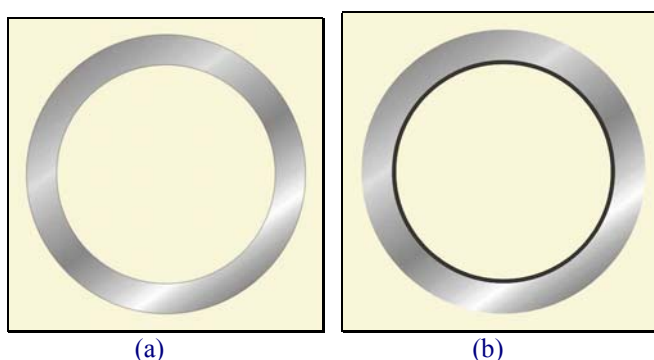


FIG. 1: Tubo HP40 (a) recebido de fábrica e (b) após a passivação

A pirólise de hidrocarbonetos apresenta como subproduto, formação de coque nas paredes internas do tubo. Aderido à parede inibe a transferência de calor da mistura dos gases de combustão ao hidrocarboneto. Para compensar a queda na condutividade se faz necessário um aumento de temperatura na parede externa do tubo. Isto acarreta superaquecimento em dadas regiões, podendo localmente atingir temperaturas superiores a 1050°C , levando a desestabilização do Cr_2O_3 protetor e aumentando significativamente a difusão de carbono à matriz.

Além do superaquecimento, o coque depositado causa a redução do diâmetro interno do tubo, acarretando aumento de pressão de entrada, com desvantagem para a produção de etileno. Por causa destas duas razões, o coque deve ser periodicamente removido.

A diminuição da temperatura no momento da remoção do coque, ocasiona trincas na camada de óxido, facilitando ainda mais a difusão de carbono.

A FIG. 2 representa (a) o estrangulamento do tubo no processo de formação de coque, (b) a formação de trincas no óxido protetor e (c) posterior formação de carbetos, a partir da segunda formação de coque.

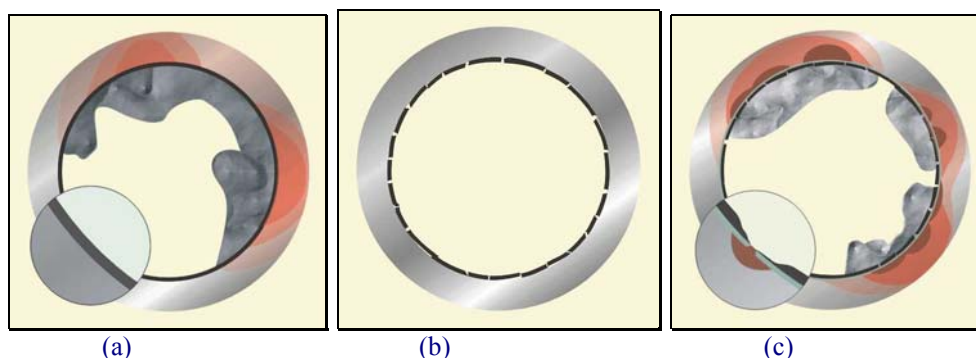


FIG. 2: Tubo HP40 com (a) formação de coque e aquecimento da superfície externa, (b) rompimento da camada de óxido por variação térmica e (c) cementação após a primeira remoção de coque

Se a temperatura do processo não variasse, a inclusão de carbono seria benéfica, conferindo ao tubo maior resistência mecânica à fluência. Porém, a diferença de dilatação térmica existente entre a matriz e região cementada ocasiona tensões internas. Estas tensões podem levar à ruptura frágil do tubo.

A FIG. 3 apresenta as regiões onde ocorre surgimento de trincas por gradiente térmico.

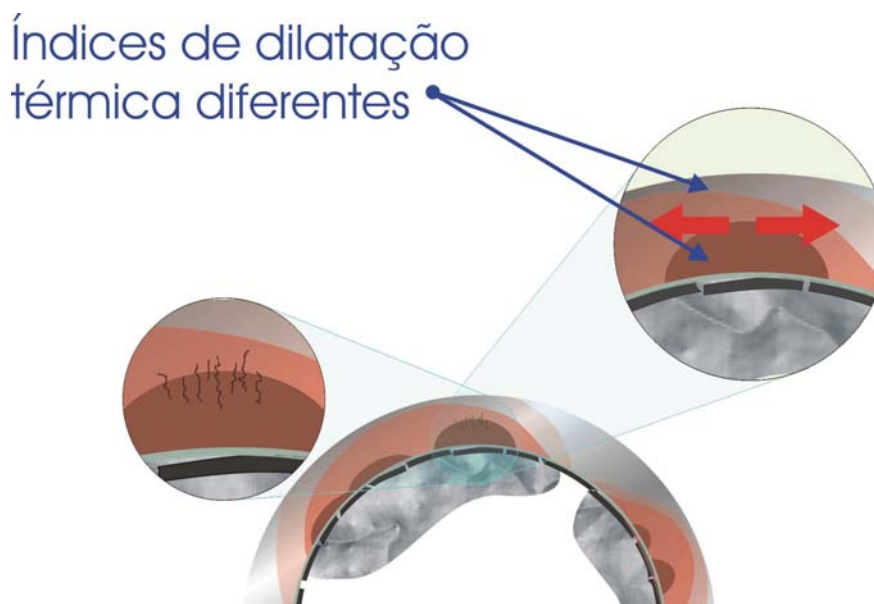


FIG. 3: Tensões internas provenientes do gradiente térmico no momento da remoção do coque.

Com o aumento de horas em trabalho (30.000 horas), efeitos acentuados de cementação tornam-se presentes:

- Formação interna de carbeto estáveis do tipo M_7C_3 e $M_{23}C_6$.
- Decomposição da cementita formando grafita e partículas metálicas com propriedades altamente ferromagnéticas.
- Precipitação de Fe_3C na superfície e nos contornos de grão.

A FIG. 4 mostra a alteração microestrutural ocorrida pela formação de carbeto em um tubo com 37.000 horas de operação, localizando a região magnética.

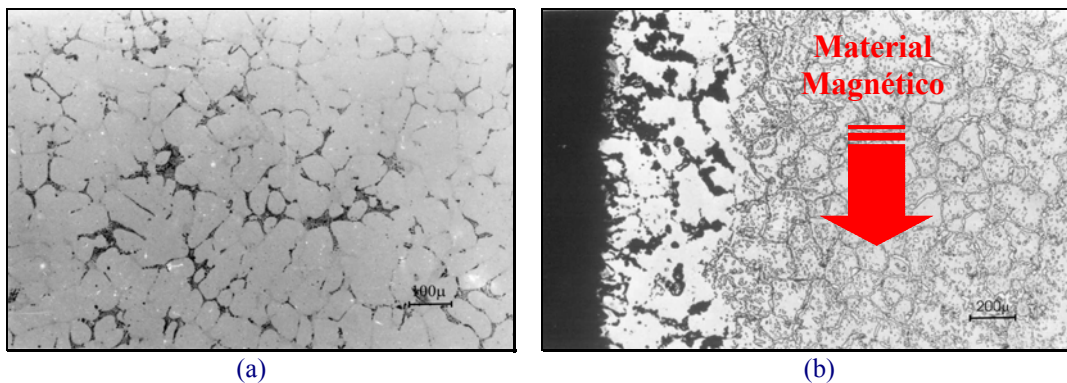


FIG. 4: Metalografia (a) de um tubo novo e (b) com 37.000 horas de uso

A formação de carbeto e grafita é acompanhada por alteração das características magnéticas do material. Estas alterações são fortes o suficiente para serem captadas por transdutores magnéticos de curta distância. A determinação da espessura existente entre a parede externa do tubo e a região magnética, permite avaliar a porcentagem de material que sofreu o processo de cementado.

O controle do grau de cementação em tubos utilizados em fornos de pirólise ainda é feito de forma estatística, sacrificando muitas vezes materiais em condições de trabalho.

A criação de um instrumento magnético de boa precisão e portabilidade, facilitaria o manuseio e a aferição, possibilitando rapidez na avaliação. Além da aplicação específica ao HP40, uma infinidade de outras aplicações comerciais pode ser desenvolvida, utilizando-se os mesmos princípios expostos neste trabalho. Como exemplo pode-se citar o monitoramento em linhas de produção, inspeção de espessura de revestimentos, magnetismo induzido por forjamento, etc...

1.3. Objetivos:

A confecção de um transdutor para avaliação de cementação exigiu uma série de cuidados experimentais, uma vez que não se dispunha de literatura adequada no que se refere aos princípios de funcionamento de instrumentos similares. No entanto somando-se as exigências de trabalho em campo às características específicas das amostras, formou-se um conjunto de parâmetros capaz de orientar sua construção.

O estudo das características magnéticas dos carbetos é o fundamento neste trabalho. Todo o procedimento de análise se baseia neste princípio.

Decidir qual princípio físico se adapta melhor a inspeção: atração magnética, utilizando como princípio de detecção força magnética ou indução magnética, utilizando como princípio a variação de indutância do sistema.

Determinar o grau de interferência causada por finas camadas ferromagnéticas entrepostas entre o sensor e a amostra.

Confeccionar transdutores de fácil utilização a baixo e custo, com simples. baixo custo,

Embora não tomada como objetivo, a versatilidade do transdutor também foi estudada, de forma a permitir análises em outras soluções sólidas de matrizes não magnéticas.

1.4. Estrutura do Trabalho

Basicamente o trabalho está dividido em cinco capítulos:

- a) Introdução (capítulo 1): síntese do trabalho.
- b) Revisão Bibliográfica (capítulo 2): abordagem dos assuntos teóricos necessários para o acompanhamento da pesquisa (dedução equações que justifiquem o funcionamento do transdutor, leis eletromagnéticas que governam os circuitos elétricos e magnéticos, construção de transdutores de atração magnética e de indução, caracterização das espécies metálicas, etc...).
- c) Materiais e Métodos (capítulo 3): explicação da construção, calibração, análise e alterações de transdutores durante a pesquisa.
- d) Resultados e Discussões (capítulo 4): análise das limitações de cada instrumento, resultados e comparação com outros instrumentos de medida.
- e) Conclusões (capítulo 5): conclusão e questionamentos encontrados na pesquisa.
- f) Sugestões de Continuidade (capítulo 6): sugestões de prosseguimento do trabalho, evoluções do instrumento e emprego em outras áreas de inspeção não destrutiva.

1.5. Metodologia Utilizada

A primeira abordagem do problema foi realizada com transdutores de força, por apresentarem facilidade e baixo custo de construção. Porém, este recurso mostrou-se inadequado frente às propriedades magnéticas descobertas durante a pesquisa.

Alguns comentários no corpo deste trabalho, fazem referência a modificações de metodologia, ocorridas frente a descoberta de novas propriedades da amostra, Comentários, análises, sugestão de aprimoramentos e rejeição de transdutores procuram conduzir a pesquisa ao essencial, deixando à etapas futuras estudo detalhado da geometria e configuração do campo disperso.

Modificou-se o primeiro transdutor de efeito atrativo para transdutor indutivo, evitando-se efeitos de histerese magnética no material. Buscou-se, em seguida, a linearização das funções de transferência para tornar o aparelho o mais universal possível,

das funções de transferência para tornar o aparelho o mais universal possível, mesmo conhecendo técnicas capaz de desenvolver bons resultados na ausência desta propriedade.

1.6. Limitações do Presente Trabalho

A aplicação deste transdutor é específica, centrada na inspeção de cementação em tubos da liga HP40.

Este trabalho não apresenta um grande aprofundamento na microestrutura do material por fazer parte de um projeto maior de estudo, restringindo-se apenas ao caráter magnético dos carbeto. Um estudo pormenorizado desta estrutura está sendo realizado pelo Prof. Luciano Volganoglo Biehl, mencionando o comportamento magnético desta liga frente à modificação da microestrutura.

Uma das dificuldades ainda por solucionada, embora extrínseca ao comportamento do transdutor, reside no comportamento incoerente de algumas amostras, apresentando sinais diamagnéticos em algumas regiões da liga (o transdutor indica sinais inversos aos colhidos para materiais ferromagnéticos).

1.7. Motivação

Além do trabalho acadêmico em magnetismo, que por si já se apresenta bastante atrativo, criar transdutores capazes de atender a uma ampla gama de análises ainda hoje é um campo promissor de pesquisa, senão em termos econômicos, na obtenção de conhecimentos básicos para a construção de equipamentos de precisão, destinados ao ramo petroquímico. No caso específico de análise em HP40, os transdutores comerciais ainda não atendem satisfatoriamente as necessidades, apresentando custo individual elevado.

Nenhuma pesquisa nesta área foi realizada até o momento no Brasil. Desde o primeiro momento foram encontradas muitas dificuldades para obter-se informações nesta área de pesquisa, envolta muitas vezes em segredos industriais. Recorrendo a fontes de consulta acadêmicas encontram-se aplicações gerais, normas de procedimentos, conduta necessária ao manuseio dos equipamentos específicos, porém nada em termos de construção e princípios de funcionamentos destes transdutores. Desta forma torna-se difícil precisar as fronteiras de pesquisa nesta área. O máximo de conhecimento obtido provém de “retro-engenharia”, realizada com cuidado nos equipamentos em uso.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

2.1. Transdutores

2.1.1. Definição¹

Segundo a obra Fundamentos de Instrumentação Para Monitoração e Controle de Processos, transdutor é um dispositivo que converte um estímulo (sinal de entrada) em uma resposta (sinal de saída) proporcional, adequada à transferência de energia, medição ou processamento da informação. Em geral, o sinal de saída é uma grandeza física de natureza diferente do sinal de entrada. A FIG. 5 apresenta, esquematicamente um transdutor simples.

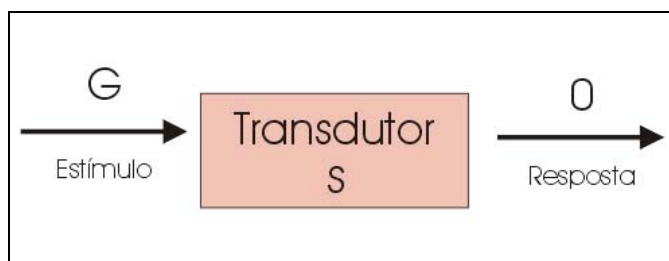


FIG. 5: Representação esquemática de um transdutor. Um estímulo G na entrada é convertido em uma resposta O na saída.

2.1.2. Transdutor Sensor

Por mais perfeito que seja o transdutor e por mais cuidados com que se realize uma medida, sempre o transdutor introduz alguma perturbação no sistema a ser medido. Sempre ocorrem algumas perturbações na transdução que se reflete como indeterminações (erros, incerteza e desvios) que devem ser agregados ao valor obtido na saída.

A parte do transdutor que interage diretamente com o sistema a ser medido é chamado “elemento sensor”. Na maior parte das vezes, este elemento é o responsável pela perturbação ou carregamento.

Qualquer transdutor é sempre caracterizado por uma ou mais funções de transferência. São relações que interligam os estímulos às respostas. Simbolicamente podem ser representados por

¹ As definições referentes a transdutores foram retiradas de **Fundamentos de Instrumentação Para Monitoração e Controle de Processos** (Borchardt, Ilton G. e Brito, R. M. - Escola de Engenharia – UFRGS – 1991).

$$O = f(G)$$

onde f deve conter o maior número de informações do sistema de medição.

Esta função pode ser expressa de modo analítico, gráfico ou por meio de tabelas. Pode representar modelos físicos que descrevem o sistema ou podem ser simples funções matemáticas resultantes de medições ou aferições.

Para melhor entendimento de um transdutor e de seus estágios, bem como para facilitar o estudo da propagação das incertezas inerentes ao mesmo, convém expressar a função acima em forma de função produto, ou seja:

$$O = S.G$$

Observa-se que S multiplicado por G resulta em O . Nesta representação o termo S é um parâmetro cujo valor numérico é denominado de *sensibilidade* e deve conter um número maior de informações. Qualquer transdutor é sempre caracterizado por uma ou mais funções de transferências.

2.1.3. Transdutores Simples e Compostos

Um transdutor é do tipo Simples quando possui apenas um estágio de transdução entre a entrada e a saída, como por exemplo, um termistor, ou um extensômetro de resistência elétrica. A FIG. 6 apresenta um Transdutor Simples constituído de um único estágio A e é representado através de um retângulo indicando o estímulo G da entrada e o sinal de saída O .

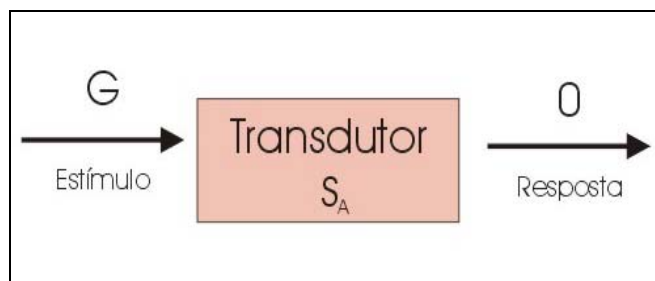


FIG. 6: Transdutor simples. Só existe um estágio de transdução entre a entrada e a saída: $O=S_A G$.

Se S_A é a Função de Transferência do Transdutor, então

$$O = S_A.G$$

Observa-se que nesta representação a função de transferência S_A é posta em forma de parâmetros que multiplicados por G levam a O .

Um transdutor é do tipo Composto quando possui mais de um estágio de transdução entre a entrada e a saída. Na FIG. 7 está esquematizado um transdutor S composto de três estágios (A, B e C) de transdução. Em cada estágio ocorre pelo menos uma alteração de natureza da informação.

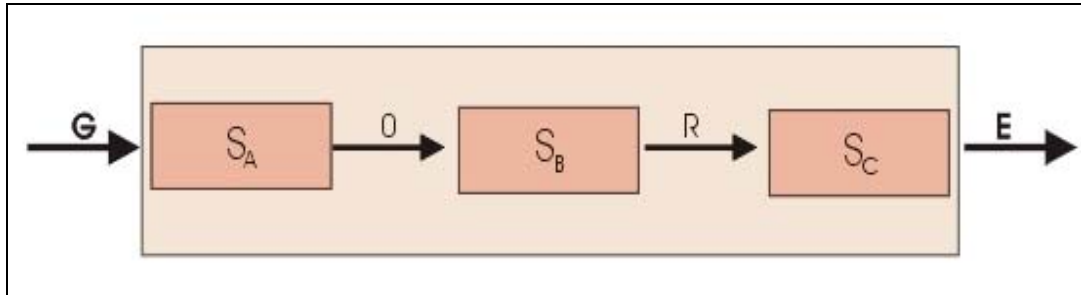


FIG. 7: Transdutor composto. Existem neste exemplo três estágios perfazendo-se três transduções distintas:
 $O = S_A \cdot G$, $R = S_B \cdot O$, $E = S_C \cdot R$

Em A ela passa de G para O , sendo $O = S_A \cdot G$ e S_A a Função de Transferência do estágio A. Em B ela passa de O para R , sendo $R = S_B \cdot O$ e S_B a Função de Transferência do estágio B e em C ela passa de R para E , sendo $R = S_C \cdot R$ e S_C a Função de Transferência do estágio C. O estágio A é o estágio sensor.

2.1.4. Transdutor Ativo e Passivo

Diz-se que um transdutor é ativo quando sua resposta é gerada espontaneamente em função do próprio estímulo. Será passivo quando necessitar de uma fonte de energia externa. A FIG. 8 apresenta um transdutor passivo, sendo E a excitação do sistema.

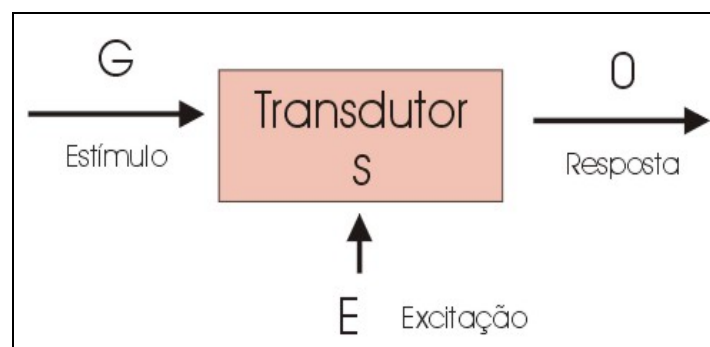


FIG. 8: Diagrama de um transdutor passivo. A resposta O é proporcional ao estímulo G , sendo $O = f(G,E)$ ou seja, O depende de G e também do nível de excitação E

2.1.5. Função Transferência e Sensibilidade

A função transferência de um transdutor é um operador S que aplicado a qualquer valor do estímulo G na entrada, fornece o valor correspondente da saída O dentro de sua faixa de operação usual.

$$O = S.G$$

Sensibilidade de um transdutor para um dado valor do estímulo g é o valor numérico s de sua função transferência S de modo que o valor numérico de saída o pode ser obtido por

$$o = s.g^2$$

A FIG. 9 mostra uma representação gráfica qualitativa de O versus G .

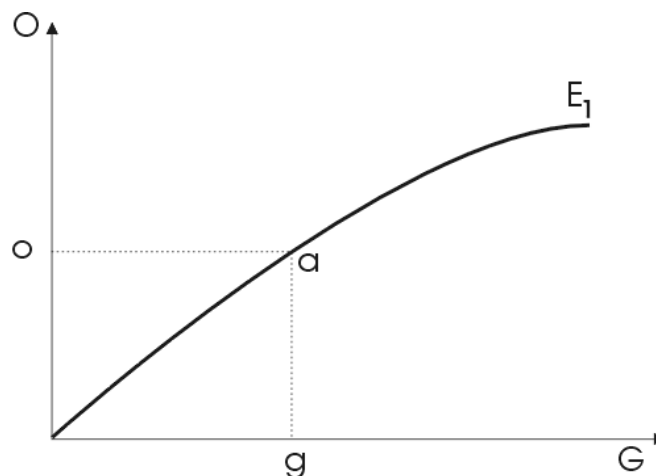


FIG. 9: Representação gráfica de uma função transferência. A sensibilidade é o valor numérico desta função. Para o ponto a tem-se $o = s.g$ onde s é a sensibilidade no mesmo ponto.

Se o Transdutor é Passivo a Função de Transferência depende da excitação E . De um modo geral, a função de transferência S ou a sensibilidade s dependem:

- Da excitação E ;
- Do valor de estímulo G ;
- Da natureza do transdutor ou de seus princípios físicos de operação F ;
- Do projeto P e dos materiais usados na sua construção;

² Uma função transferência linear apresenta uma sensibilidade constante, facilitando a leitura no transdutor. O caso não linear, deve-se conduzir, adotando-se trechos ou faixas de estímulos onde a sensibilidade possa ser tomada como constante.

- De outros fatores D, inclusive perturbações diversas tais como temperatura, umidade, posição, etc.

Simbolicamente pode-se escrever:

$$S = f(G, E, F, P, D)$$

2.1.6. Princípio Físico de Operação de um Transdutor Indutivo

A equação básica para um transdutor indutivo que opera por variação de indutância é

$$L = N(d\phi/di) \quad \text{Equação 1}$$

Onde L é a indutância (Henry), N é o número de espiras cortadas pelo fluxo magnético, e $d\phi/di$ a razão de variação do fluxo com a intensidade de corrente elétrica.

Pode-se alterar $d\phi/di$, variando-se a relutância do circuito magnético, ou seja, variando o comprimento do caminho magnético percorrido pelo fluxo magnético, a área de sua seção transversal, ou sua permeabilidade, conseguindo-se assim alterar a indutância do dispositivo. Outra forma de conseguir alteração na indutância é através de um meio magnético móvel ou de variação da permeabilidade que pode sofrer alteração na composição físico-química de uma porção (parte) do percurso do fluxo, ou ainda pela aplicação de uma tensão mecânica num material ferromagnético colocado neste percurso. Também indução de correntes de “Foucault”, com a resultante rotação do eixo magnético do material pode-se obter efeitos de variação da indutância.

Observe-se, no entanto, que o uso de materiais magnéticos resulta, na maioria dos casos, em dispositivos não lineares que requerem atenções especiais no uso ou nos circuitos condicionadores de sinais.

Alguns tipos de transdutores indutivos utilizam mais de um enrolamento. Neste caso o que varia é o acoplamento magnético entre os enrolamentos (primário, secundário(s)). Usualmente, o sinal de saída é uma voltagem induzida no enrolamento(s) secundário(s). Exemplo: LVDT, inductosyn, etc.

Transdutores indutivos são passivos e requerem uma fonte de excitação externa, de corrente alternada com variação senoidal. Eles podem ser usados em um divisor de tensão ou em circuitos tipo ponte de Wheatstone ou em circuitos osciladores.

2.1.7. Sistema de Medição

Medir é o ato de comparar quantitativamente um valor desconhecido de uma grandeza com um padrão pré-definido de mesma natureza da grandeza que se quer mensurar.

A maior parte dos sistemas de medição pode ser entendido a partir de um esquema geral constituído de três estágios conforme a FIG. 10.



FIG. 10: Esquema geral de um sistema de medição

O primeiro estágio é o Transdutor propriamente dito. Tratando-se de um sistema de medição, este Transdutor será sempre do tipo simples ou composto, ativo ou passivo.

O segundo estágio é o chamado Condicionador de Sinais. Recebe na sua entrada o sinal elétrico proveniente do Transdutor e o “condiciona”, apresentando na sua saída um sinal adequado ao estágio Indicador. As operações realizadas no condicionador podem ser de amplificação, eliminação de ruídos, realização de operações matemáticas (integração, diferenciação, logaritmação, adição, subtração, divisão, etc...).

O estágio Indicador apresenta o resultado da medida na forma visual. Pode ser um Indicador analógico do tipo voltímetro ou amperímetro ou ainda um registrador Gráfico do tipo XT (deslocamento x tempo) ou XY (deslocamento x deslocamento), ou então um indicador digital em dígitos de segmentos ($3\frac{1}{2}$, $4\frac{1}{2}$ dígitos, etc...). Modernamente, um Sistema de Medição pode ser totalmente controlado por um computador, com armazenamento estatístico da informação e apresentação de relatórios impressos sob forma gráfica ou numérica. Um dos transdutores utilizado neste trabalho, faz parte de Sistema de Medição complexo, semelhante ao esquema mostrado na FIG. 11.

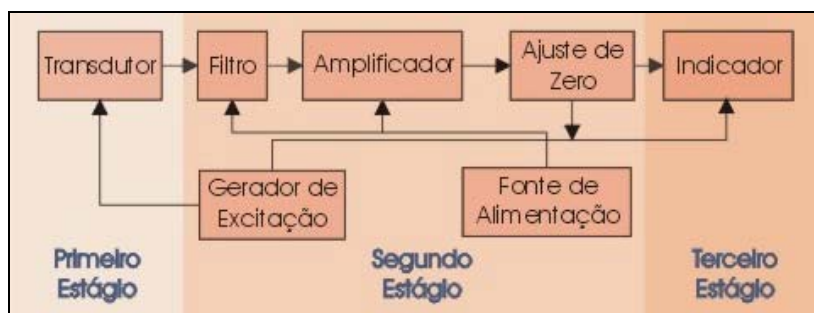


FIG. 11: Diagrama de blocos de um sistema complexo de medições.

2.1.8. Calibração

A característica fundamental de um sistema de medição é sem dúvida a sua precisão. Esta característica é obtida através de um procedimento estatístico de medida de uma determinada grandeza física. Este procedimento se justifica porque um sistema, ao ser utilizado para medir uma grandeza física, pode apresentar indicações ligeiramente dispersas. Para um conjunto de medidas efetuadas com o sistema, tomando-se por referência um estímulo padrão, calcula-se a média aritmética \bar{x} e o desvio padrão σ . A relação σ / \bar{x} é definida como índice de precisão, ou simplesmente precisão da medida. Assim um sistema pode ser classificado de acordo com este índice que expresso de forma percentual, define a classe de precisão do sistema de medida.

Outro conceito bastante utilizado para caracterizar sistemas de medição, e especialmente instrumentos de medição é o conceito de exatidão. Exatidão é a característica de um instrumento de medição que exprime o afastamento entre a medida nele efetuada e o valor de referência aceito como verdadeiro. Pode-se assim concluir que um instrumento de grande precisão pode não ser exato. No caso de instrumentos elétricos, utilizar-se a indicação de sua exatidão baseado num percentual referido ao valor de fundo de escala (que traduz diretamente a incerteza) e um valor probabilístico de afastamento do valor verdadeiro que pode ser esperado em qualquer medida efetuada com este instrumento nesta escala.

2.1.9. Análise de Curva de Calibração

Em geral, a curva de calibração de um instrumento, é obtida pela verificação da resposta (indicação analógica ou digital da grandeza de saída de um estágio ou de um sistema) em função do estímulo aplicado à entrada (do estágio ou do sistema).

Esquemáticamente a representação de uma curva de calibração é o registro gráfico da função de transferência real do transdutor, obtida sob determinadas condições de ensaio (norma de ensaio).

Esta curva pode ser traçada a partir de um único conjunto ou bateria de medidas (um valor da resposta para cada valor do estímulo) ou pela medida das respostas para diversas aplicações de cada estímulo. Quando se realiza este último procedimento tem-se a idéia de repetibilidade. Este parâmetro define a capacidade do tradutor indicar a mesma resposta para diversas aplicações do mesmo estímulo na sua entrada. A repetibilidade pode

ser expressa também percentualmente, tomando como referência o valor nominal do transdutor.

Observa-se na FIG. 12 que a resposta não é uma função unívoca do estímulo. Para um mesmo estímulo g podem ocorrer dois valores distintos a e b da resposta. Tudo depende de se g foi alcançado por valores crescentes ou decrescentes (daí o sentido das flechas sobre a curva de aferição). Nestas condições a maior diferença obtida na resposta ($a - b$) para o mesmo estímulo, é o que se denomina de histerese. É também definida como um percentual do valor nominal.

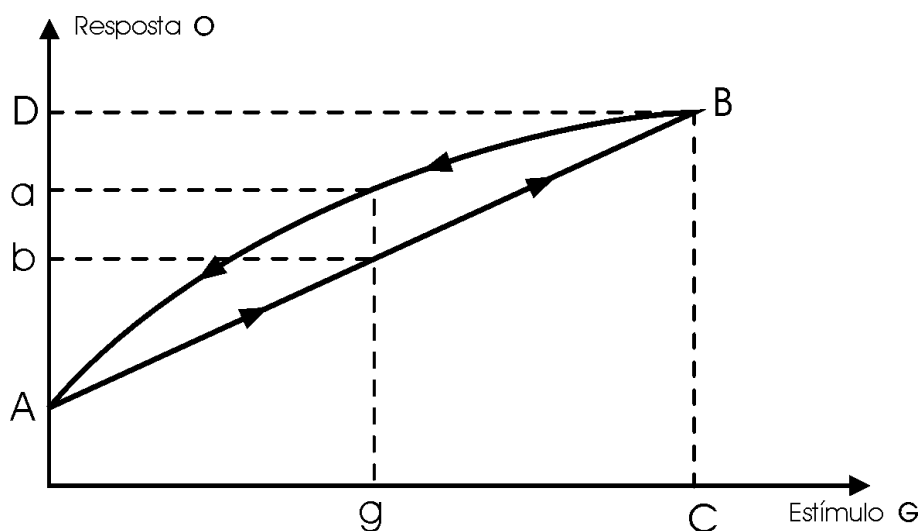


FIG. 12: Curva de calibração de um transdutor. A = resposta para estímulo nulo. B = valor limite do estímulo aplicado a entrada. D = valor limite da resposta para o estímulo limite.

Um grande número de transdutores tem uma função de transferência teórica linear. Na prática, ao realizar o ensaio de calibração, a linearidade pode ser facilmente aferida. Define-se como linearidade a medida do desvio da curva de calibração em relação a uma reta de referência. É importante que esta reta seja perfeitamente identificada, pois devido à falta de uma normalização são referidas pelos fabricantes diferentes retas, a saber:

- a linha reta que liga o ponto inicial A (definido pelo par de coordenadas em que o estímulo é nulo e a resposta correspondente pode ou não ser nula) e o ponto B (caracterizado pelo par de coordenadas em que o estímulo é o valor limite ou valor nominal aplicado à entrada e a resposta é o valor definido como o valor nominal da resposta ou o valor do fundo de escala).
- a linha que melhor se ajusta aos pontos levantados na curva de calibração (obtida pelo método dos mínimos quadrados).

- a linha reta que passa pelo ponto inicial A e um ponto Y que corresponde a uma resposta equivalente a 75 % do valor nominal considerando-se o trecho ascendente da curva de calibração (Projeto de Norma Brasileira para Células de Carga).

A linearidade é muitas vezes referida como não linearidade através de um valor percentual do valor nominal, devendo corresponder então a um desvio (relativo ou percentual) máximo em relação à reta de referência.

Outra característica importante é a resolução. Este parâmetro define a capacidade com que o transdutor pode discernir quantitativamente mínimas variações do sinal de entrada (estímulo) quando se observa apenas o sinal de saída (resposta). É muitas vezes confundida com a sensibilidade do transdutor. Observa-se que às vezes o transdutor ou o instrumento que se está utilizando é sensível a uma variação do estímulo, mas é impossível avaliar a variação ocorrida na resposta em função da graduação da escala, da digitalização da informação ou da espessura no traço de um registrador gráfico. Enquanto a sensibilidade está relacionada com a detecção do estímulo a resolução está relacionada com a visualização da resposta.

Ainda observando a curva de calibração pode-se avaliar o equilíbrio de zero ou “offset” (popularizado no termo inglês). É o valor da resposta para um estímulo nulo. Pode também ser referido como desequilíbrio de zero ou zero estático.

É ainda útil que se defina o parâmetro denominado de Razão de Transdução que é a derivada da resposta em relação ao estímulo calculada para cada ponto da curva. Caso a Curva de calibração seja uma reta, a Razão de Transdução é igual a Sensibilidade. Caso a curva não seja linear pode-se decompô-la em segmentos de reta utilizando uma Razão de Transdução para cada trecho.

2.2. Teoria dos Erros

2.2.1. Valor Numérico, Indeterminação e Unidade.

Toda grandeza física é caracterizada por um valor numérico (vn), uma indeterminação e uma unidade. Por exemplo, se uma medida de comprimento for:

$$(20,0 \pm 0,2) \text{ mm}$$

então 20,0 é o valor numérico, 0,2 a indeterminação e mm a unidade.

2.2.2. Erro: Indeterminação Calculável.

“Erro, por definição, é a diferença entre o valor obtido (ou medido) e o valor verdadeiro, diferença esta decorrente de causas não só conhecidas como perfeitamente determináveis”³.

Erro é uma perturbação externa (desajuste de zero no caso dos transdutores neste trabalho) que atua sobre o sistema de forma perfeitamente previsível e, como tal possui sempre o mesmo sentido ou o mesmo sinal.

O erro mais comum é decorrente da interação entre o Sistema de Medida (Transdutor ou Indicador) e o sistema que está sendo medido.

2.2.3. Incerteza: Indeterminação Estimada

“Incerteza por definição, é a diferença entre o valor obtido (ou medido) e o valor verdadeiro, diferença esta decorrente de fenômenos incontroláveis e não repetitivos, embora às vezes conhecidos”.

2.2.4. Desvio: Indeterminação Estatística

“Desvio, por definição, é a diferença entre o valor obtido (ou medido) em uma medida e o valor médio de diversas medidas. Valor médio é a média aritmética de uma série de medidas”.

Em um experimento que não contém erros ou que foram corrigidos incerteza e desvio se confundem.

³ As definições referentes a transdutores foram retiradas de **Fundamentos de Instrumentação Para Monitoração e Controle de Processos** (Borchardt, Ilton G. e Brito, R. M. - Escola de Engenharia – UFRGS – 1991).

O valor médio é um dos parâmetros fundamentais na definição de desvio que é por definição obtido através da Média Aritmética de várias medidas. Teoricamente necessitar-se-ia de um número infinito de medições para obter um “bom” valor médio. Contudo, quase sempre, um número pequeno de medições já é suficiente para caracterizar um valor médio com precisão aceitável. Isto depende da forma como os valores obtidos se aglomeram em torno deste valor.

Se os resultados de um experimento obedecem às leis da estatística, ou seja, se eles se situa e se distribuem de forma aleatória em torno de um valor médio pode-se dizer que este representa o Valor Verdadeiro e ainda que o desvio padrão representa a Incerteza. Considere ainda que os resultados obtidos sejam simetricamente distribuídos em torno de um valor médio, ou seja, obedecem a distribuições estatísticas denominadas Normais ou Gaussianas. Bastam dois parâmetros para caracterizá-la: o Valor Médio \bar{x} e o desvio σ . O valor médio é a Média Aritmética dos valores medidos e o Desvio Padrão corresponde a uma faixa de valores entre $(\bar{x} - \sigma)$ e $(\bar{x} + \sigma)$ de modo que a probabilidade de se encontrar num experimento um valor dentro da faixa é de 0,68 ou 68%. De forma algébrica pode-se expressar o Desvio Padrão pela Equação 2.

$$\delta_{\pi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Equação 2

2.3. Propagação de Incerteza

Em se tratando de grandezas independentes X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) e cujos valores numéricos x_i foram determinados por instrumentos diferentes, resultando incertezas Δx_i independentes, aceita-se que a incerteza resultante da $R = r \pm \Delta r$ seja calculada pela Equação 3.

$$(\Delta r)^2 = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \right) \Delta x_i \right]^2$$

Equação 3

Supondo que a função R assuma a forma de produto ou quociente de n grandezas físicas X_i , ou seja,

$$R = X_1 * X_2 * \dots * X_n \text{ ou } R = X_1 : X_2 : \dots : X_n,$$

e que os resultados obtidos sejam simetricamente distribuídos em torno de um valor médio, ou seja, obedecem a distribuições Gaussianas, a equação geral Equação 3 pode ser simplificada para:

$$\left(\frac{\Delta \mathbf{r}}{\mathbf{r}}\right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta \mathbf{x}_i}{\mathbf{x}_i}\right)^2 \quad \text{Equação 4}$$

A Equação 4 não pode ser aplicada a produtos de função uma vez que a diferencial $\frac{\partial R}{\partial t}$ necessariamente, não será expresso como produto.

2.4. Contribuição do Sistema de Medida na Indeterminação Final da Medida

Um sistema de Medição é constituído por três estágios distintos: o Transdutor, o Condicionador e o Indicador (computador ou instrumento indicador). Cada estágio possui sua função de transferência S_t , S_c e S_i ou sensibilidades s_t , s_c e s_i e contribui de forma independente para uma saída final “O”. Assim a sensibilidade s do Sistema de Medição ou Função de Transferência S pode ser calculada por

$$s = (s_t \cdot s_c \cdot s_i) \quad \text{ou} \quad S = (S_t \cdot S_c \cdot S_i)$$

ou seja, a sensibilidade de um Transdutor é produto das sensibilidades de seus estágios.

Desta forma, pela Equação 4, segue-se que:

$$\left(\frac{\Delta \mathbf{s}}{\mathbf{s}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta \mathbf{s}_t}{\mathbf{s}_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{s}_c}{\mathbf{s}_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{s}_i}{\mathbf{s}_i}\right)^2 \quad \text{Equação 5}$$

onde a parcela do segundo membro são as indeterminações relativas introduzidas por cada estágio do Sistema de Medição. Como estas parcelas aparecem em forma quadrática, convém para efeitos de custo, que o s estágios sejam de mesma Classe de Precisão.

2.5. Análise de Circuito Magnético

Segundo Vembu Gourishankar⁴, o conhecimento da densidade de fluxo magnético na estrutura de um transdutor magnético deve ser perfeitamente conhecida afim de projetá-lo em suas características específicas. Em geral este é um problema de campo tridimensio-

⁴ Vembu Gourishankar e Donald H. Kelly; **Electromechanical Energy Conversion**. Thomas Y. Crowell Company Ublishers, New York, 1973 – Secund Edition.

nal. Porém, em muitos casos é possível reduzi-lo a uma dimensão e aproximar-lo a um circuito magnético. Tais circuitos geralmente contêm elementos mecânicos, elétricos ou magnéticos.

Nos estudos feito neste trabalho, utiliza-se dois tipos de estrutura magnética do qual seus circuitos magnéticos são apresentados nas FIG. 13 e FIG. 14⁵. A técnica de aproximação destes sistemas a circuitos é baseada nos seguintes postulados:

a) a configuração geométrica dos aparelhos é simétrica em relação a algum eixo ou plano, de forma a poder-se representar o sistema por um esquema.

b) um fluxo magnético constante ou levemente variado tem a tendência de confinar-se quase que totalmente no caminho de alta permeabilidade magnética (estrutura ferromagnética na FIG. 13b) da mesma forma que uma corrente constante ou pouco variada tem a tendência de confinar-se no caminho de maior condutividade nos circuitos elétricos.

Isto pode ser notado pelas duas componentes do fluxo mostrado na FIG. 13a, o fluxo principal ou útil ϕ_m , totalmente imerso no núcleo ferromagnético e o fluxo disperso ϕ_l , permanecendo parte interno e parte externo.

O ar serve como um isolante de fluxo na estrutura ferromagnética, exceto quando aberturas de ar são introduzidas para outros propósitos.

A permeabilidade da maioria dos materiais ferromagnético de uso normal apresenta densidade de fluxo magnético numa faixa de operação entre 10^3 a 10^4 vezes μ_0 , onde μ_0 é assumido como permeabilidade magnética do ar. Esta razão, muito embora alta, não é suficiente para confinar todas as linhas de fluxo dentro do núcleo ferromagnético. Por exemplo, se o potencial magnético entre dois pontos no núcleo (físicamente fechados) for alto, certamente ocorrerá fluxo magnético disperso. O circuito mostrado na FIG. 13c e FIG. 14c assumem que fluxo disperso é desprezível. Esta suposição não pode ser tomada como regra. Cada problema deve ser examinado e julgado separadamente.

É muito difícil expressar o fluxo disperso em termos matemáticos. Fórmulas empíricas são utilizadas em circuitos magnéticos onde o fluxo disperso é uma exigência de projeto.

⁵ Estas figuras foram adaptadas do livro citado acima - Fig. 3-1 e Fig. 3-2, pág. 70-71

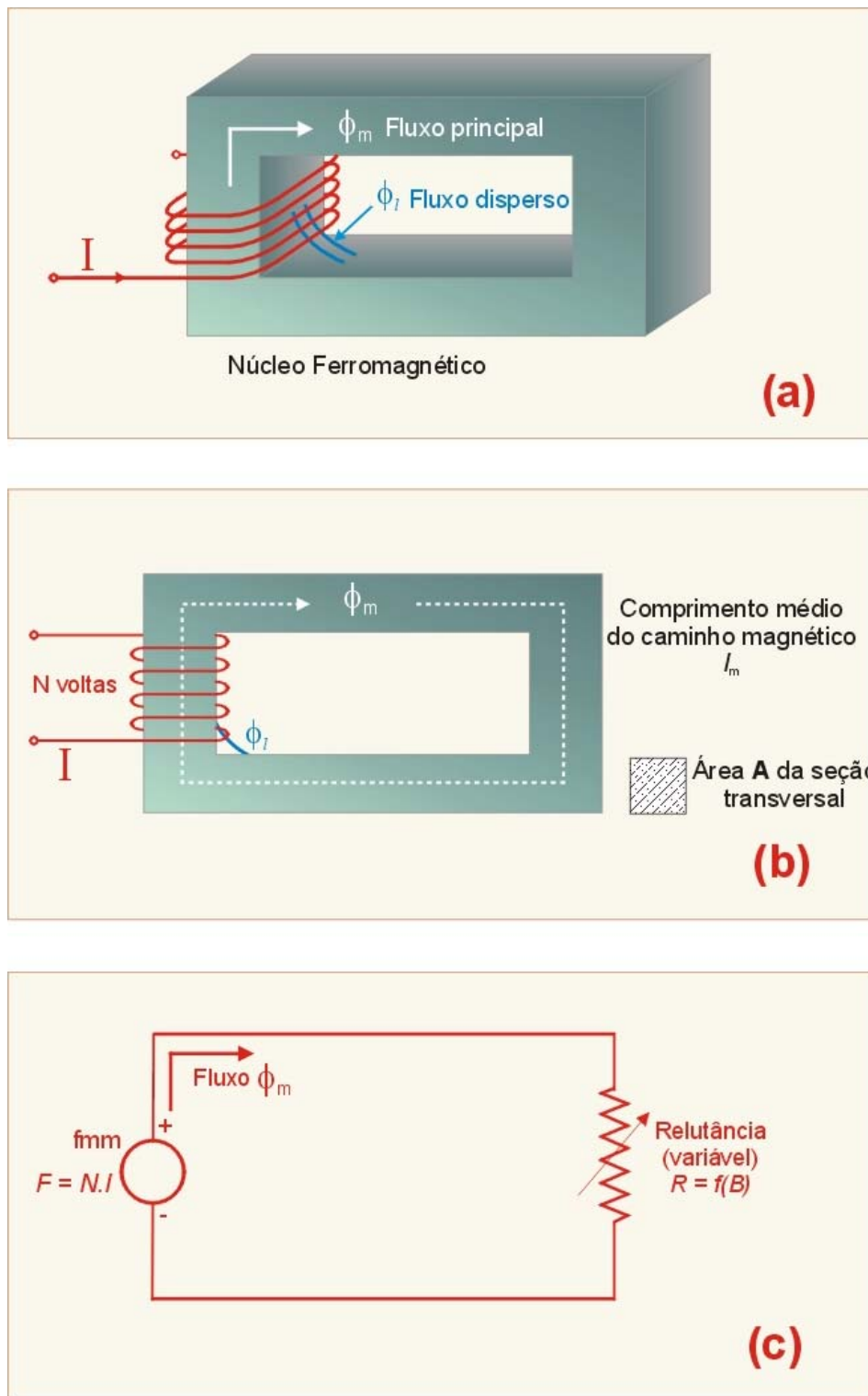


FIG. 13: (a) Estrutura magnética de núcleo de ferro e bobina indutora.
 (b) Diagrama esquemático da estrutura.
 (c) Circuito magnético do sistema.

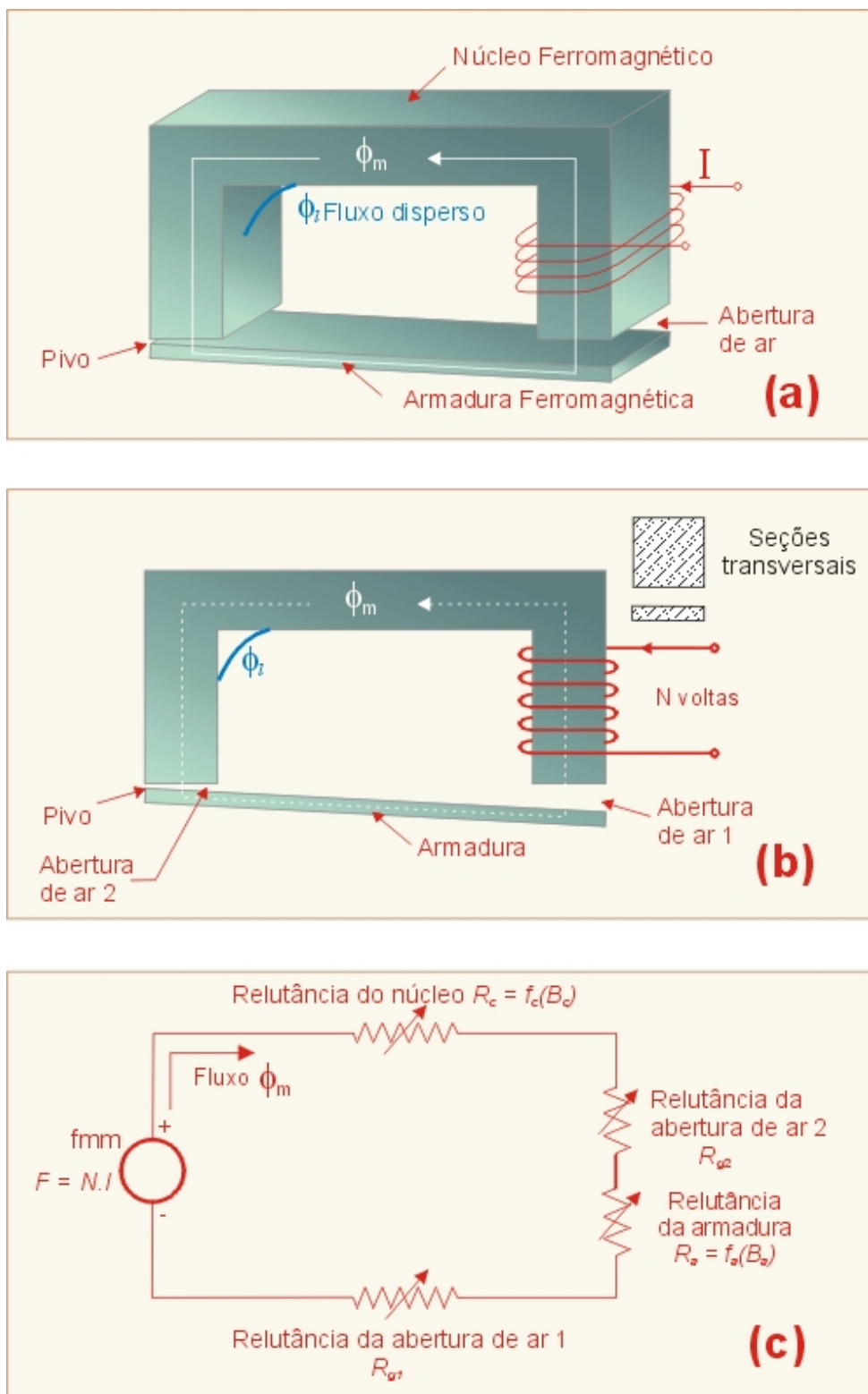


FIG. 14: (a) Estrutura magnética de um sistema com aberturas (entreferos).
 (b) Diagrama esquemático da estrutura.
 (c) Circuito magnético do sistema

Para a análise das estruturas ferromagnéticas utilizadas neste trabalho foram utilizados os seguintes princípios:

- a) As dimensões da estrutura magnética são tais que a densidade de fluxo em uma área transversal da estrutura pode ser considerada uniforme. Desta maneira, o fluxo no interior do núcleo pode ser obtido através da Equação 6.

$$\text{Fluxo } \phi = B.A \quad \text{Equação 6}$$

onde B é a densidade de fluxo e A a área de seção transversal.

- b) O comprimento do caminho médio pode ser utilizado em todos os cálculos.
c) A intensidade do campo magnético depende do comprimento da bobina.

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{N.I}}{l} \quad \begin{array}{l} H = \text{intensidade do campo magnético (Ae/m)} \\ N.I = \text{força magnetomotriz (Ae)} \\ l = \text{distância entre os polos da bobina (m)} \end{array} \quad \text{Equação 7}$$

- d) A Equação 7 pode ser utilizada para calcular a força magnetomotriz F total requerida para estabelecer uma quantidade específica de fluxo magnético no circuito. Por exemplo na FIG. 13, tem-se:

$$F = N.I = H.l_m$$

Na FIG. 14, onde existem quatro seções em série, pode-se escrever:

$$F = N.I = H_c.l_{cm} + H_a.l_{am} + H_{g1}.l_{g1m} + H_{g2}.l_{g2m}$$

onde o subscritos c, a, g₁ e g₂ significam respectivamente núcleo, armadura e as aberturas de ar. Em geral, temos

$$\mathbf{F} = \mathbf{N.I} = \sum_{i=0}^n H_i l_{im} \quad \text{Equação 8}$$

onde l_{im} é o caminho magnético médio da $e^{nésima}$ seção no circuito em série e H_i é a intensidade magnética na $e^{nésima}$ seção. A Equação 8 é análoga a lei de Kirchhoff para voltagem em circuitos elétricos. Esta lei, estabelecida em termos de quantidades magnéticas, é a seguinte:

“A soma algébrica do potencial magnético em torno de um caminho magnético fechado é zero; em outras palavras, a soma dos potenciais saindo é igual à soma dos potenciais entrando em um circuito fechado em série”.

- e) Agora, considere uma região magnética da estrutura onde as diversas partes do fluxo magnético se combinem como representado na FIG. 15. Por um instante, considere o ponto P (ou, estritamente dizendo, uma área infinitesimalmente pequena fechada P). Uma superfície fechada está incluindo o ponto P. No entanto, como $\text{Divergente } B = 0$, a soma dos fluxos que chegam na junção P é igual a soma dos fluxos que saem da junção.

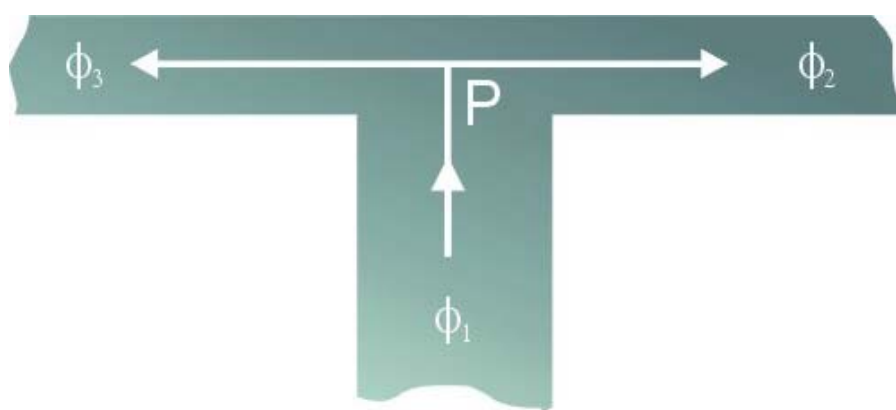


FIG. 15: Continuidade das linhas de fluxo em uma junção na estrutura magnética.

Esta equação é análoga a lei das correntes de Kirchhoff para circuitos elétricos. O fluxo disperso é desprezado na Equação 9.

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_3$$

Equação 9

2.6. Primeira Proposta Para Investigar a Relação entre Intensidade de Corrente (I) e Espessura de Entreferro (g(x))

a) Para dois entreferos

Na FIG. 16, tem-se o transdutor magnético deslocando-se sobre um gabarito em cunha⁶. A variação de espessura g(x) de entreferro produz variação de indutância.

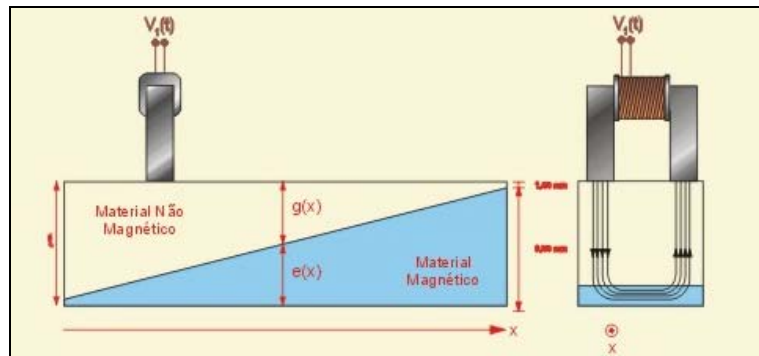


FIG. 16: Indutor passivo sobre o gabarito em vista lateral

Considerando $V(t)$ uma voltagem alternada senoidal, a intensidade de corrente do sistema da FIG. 17 pode ser escrita como:

$$i(t) = \frac{V_1(t)}{Z} \quad \text{Equação 10}$$

onde $V(t)$ é a voltagem imprimida por uma fonte e Z é a reatância total do sistema.

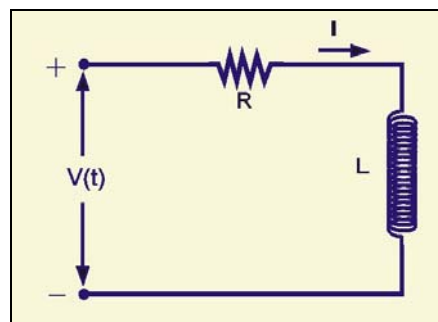


FIG. 17: Circuito LR contendo resistência (r_1) e indutância externas (L_1) ao transdutor

Utilizando-se a forma complexa da impedância,

$$Z = R + Xj$$

é possível reescrever a Equação 10 na forma

⁶ Este gabarito é minuciosamente descrito na seção 3.4. Construção de Transdutores

$$i(t) = \frac{V(t)}{R + j\omega L}$$

$$i(t) = \frac{V(t)(R - j\omega L)}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Com $|z|^2 = z \cdot \bar{z}$

$$|i(t)| = \frac{V(t)}{R^2 + (\omega L)^2} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \frac{V(t)}{[R^2 + (\omega L)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$|i(t)| = \frac{V(t)}{[R^2 + (\omega L)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

Equação 11

A FIG. 18 apresenta o circuito magnético simplificado para um transdutor magnético de dois entreferros.

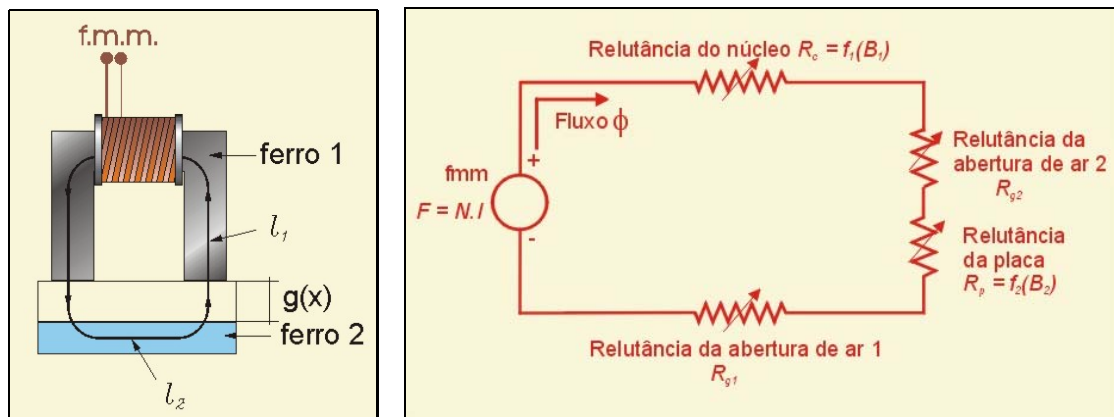


FIG. 18: Circuito magnético simplificado do sistema de inspeção com dois entreferros

A partir deste esquema é possível chegar às seguintes equações:

$$F = \sum_{i=0}^n H_i l_i$$

$$N.I = H_1 l_1 + H_g l_g + H_2 l_2 + H_g l_g$$

$$N.I = H_1 l_1 + H_g g(x) + H_2 l_2 + H_g g(x)$$

$$N.I = H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2.H_g g(x)$$

$$N.I = \frac{B_1}{\mu} l_1 + \frac{B_2}{\mu} H_2 l_2 + 2 \cdot \frac{B}{\mu_0} g(x)$$

Como $\mu_0 \ll \mu$

$$N.I \approx 2 \frac{\phi}{A \cdot \mu_0} g(x)$$

Equação 12

Diferenciando a Equação 12,

$$N \frac{dI}{dt} = \frac{2 \cdot g(x)}{A \cdot \mu} \frac{d\phi}{dt}$$

Porém $\frac{d\phi}{dt} = \frac{V_{\text{ind}}}{N}$ e $\frac{dI}{dt} = \frac{V_{\text{ind}}}{L}$

$$L = \frac{N^2 A \mu_0}{2 g(x)}$$

Equação 13

Substituindo estes valores na Equação 11,

$$|i(t)| = \frac{V(t)}{\left\{ R^2 + \left(\frac{N^2 \mu_0 A \omega}{2 g(x)} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} = \frac{2 g(x) \cdot V(t)}{\left\{ (2 g(x) R)^2 + (\omega N^2 A \mu_0)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

Equação 14

Caso $R \approx 0$

$$|i(t)| = \frac{2 \cdot V(t) \cdot g(x)}{\omega \cdot N^2 A \mu_0} \text{ ou ainda}$$

$$i(t) = k \cdot g(x)$$

Equação 15

Verifica-se a existência de linearidade entre corrente e espessura de entreferro caso as suposições adotadas durante a dedução sejam satisfeitas:

- A deve permanecer constante, evitando efeitos de borda no campo magnético;
- $g(x)$ deve variar muito pouco entre os entreferros;
- $V(t)$ deve permanecer estável durante o processo.
- Todas as considerações estão dentro da região linear do material magnético.

b) Para três entreferros

A FIG. 19 apresenta o circuito esquemático do indutor com três entreferros.

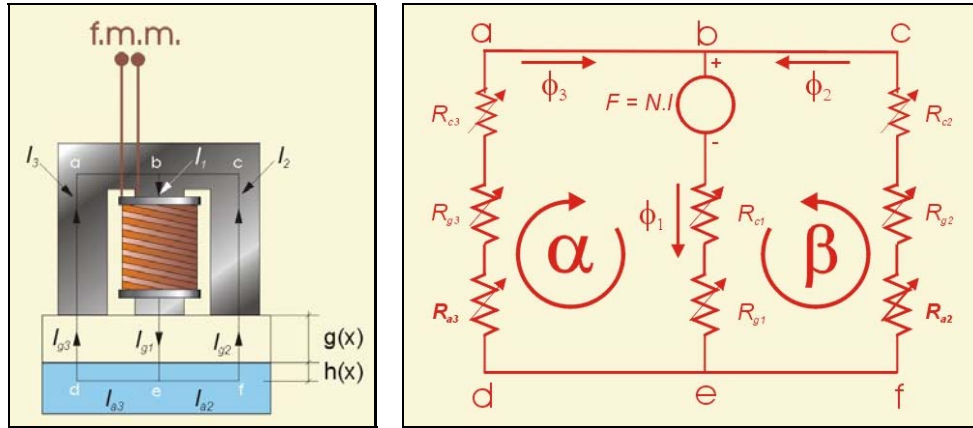


FIG. 19: Circuito magnético simplificado do sistema de inspeção de três entreferros

O circuito magnético da FIG. 19 apresenta os fluxos magnéticos $\phi_1 = \phi_2 + \phi_3$

Caminho be: fluxo ϕ_1 ; queda de potencial magnético $F_1 = H_1 l_1 + H_{g1} l_{g1}$

Caminho befc: fluxo ϕ_2 ; queda de potencial magnético $F_2 = H_2 l_2 + H_{g2} l_{g2} + H_{a2} l_{a2}$

Caminho beda: fluxo ϕ_3 ; queda de potencial magnético $F_3 = H_3 l_3 + H_{g3} l_{g3} + H_{a3} l_{a3}$

Como o circuito está em paralelo, $F_1 = F_2 = F_3 = F = N.I$

$$(\alpha) \quad F = N.I = H_1 l_1 + H_{g1} l_{g1} + H_3 l_3 + H_{g3} l_{g3} + H_{a3} l_{a3}$$

$$(\alpha) \quad \mathbf{F} = \mathbf{N.I} = \frac{\phi_1 l_1}{\mu_C A_1} + \frac{\phi_1 g_1(x)}{\mu_0 A_1} + \frac{\phi_3 l_3}{\mu_C A_3} + \frac{\phi_3 g_3(x)}{\mu_0 A_1} + \frac{\phi_3 l_{a3}}{\mu_a A_a}$$

como $A_1 = A_3$ e $g_1(x) = g_2(x)$

$$(\alpha) \quad \mathbf{F} = \mathbf{N.I} = \frac{\phi_1 l_1}{\mu_C A_1} + \frac{(\phi_1 + \phi_3) g_1(x)}{\mu_0 A_1} + \frac{\phi_3 l_3}{\mu_C A_3} + \frac{\phi_3 l_{a3}}{\mu_a A_a}$$

$$(\beta) \quad F = N.I = H_1 l_1 + H_{g1} l_{g1} + H_2 l_2 + H_{g2} l_{g2} + H_{a2} l_{a2}$$

$$(\beta) \quad \mathbf{F} = \mathbf{N.I} = \frac{\phi_1 l_1}{\mu_C A_1} + \frac{(\phi_1 + \phi_2) g_1(x)}{\mu_0 A_1} + \frac{\phi_2 l_2}{\mu_C A_2} + \frac{\phi_2 l_{a2}}{\mu_a A_a}$$

como $\mu_0 \ll \mu_a < \mu_c$ e $\phi_2 = \phi_3$, a Equação 16 pode ser escrita

$$N.I = \frac{(\phi_2 + 2\phi_3)g_1(x)}{\mu_0 A_1} = \frac{3\phi_2 g_1(x)}{\mu_0 A_1}. \text{ Diferenciando a equação obtem-se}$$

$$N \cdot \frac{\partial I}{\partial t} = 3 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \frac{g_1(x)}{\mu_0 A_1} \Rightarrow N \cdot \frac{V_{ind}}{L} = 3 \frac{V_{ind}}{N} \frac{g_1(x)}{\mu_0 A_1} \Rightarrow L = \frac{N^2 \mu_0 A_1}{3g_1(x)}$$

Substituindo estes valores na Equação 11 e adotando $R \approx 0$, obtem-se:

$$|i(t)| = \frac{3V(t) \cdot g(x)}{\omega N^2 A_1 \mu_0}$$

Equação 16

2.7. Considerações Sobre o Campo Disperso

A FIG. 20 apresenta o mesmo circuito magnético encontrado na FIG. 19 porém com o circuito 02 tendo o ar como meio magnético.

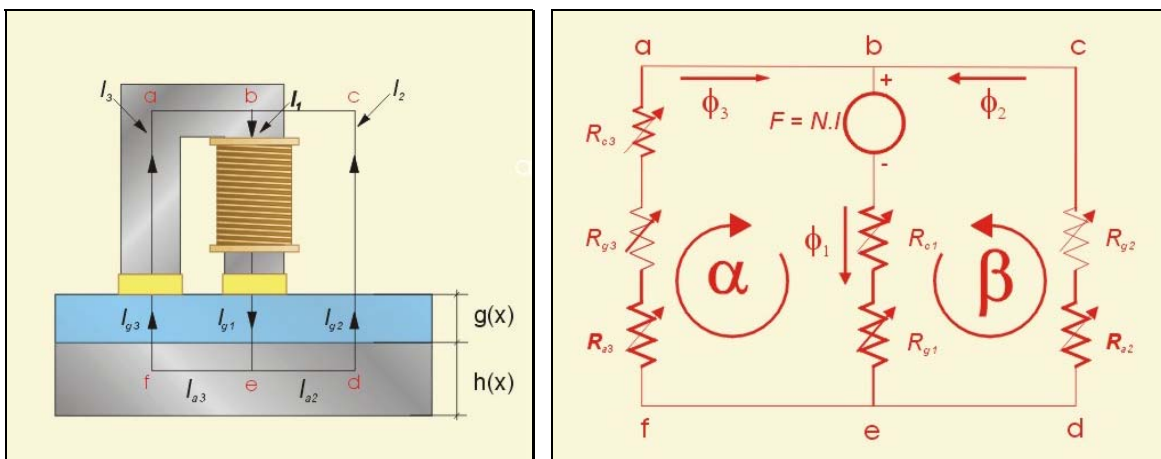


FIG. 20: Circuito magnético simplificado do sistema contendo fluxo magnético disperso

Como o fluxo ϕ_2 atravessa o ar, pode ser considerado fluxo disperso. Utilizando-se os mesmos argumentantors da seção anterior, pode-se escrever:

$$\frac{\phi_2 g_2(x)}{\mu_0 A_2} + \frac{\phi_2 l_2}{\mu_0 A_2} + \frac{\phi_2 l_{a2}}{\mu_a A_a} = \frac{\phi_3 g_3(x)}{\mu_0 A_3} + \frac{\phi_3 l_3}{\mu_c A_3} + \frac{\phi_3 l_{a3}}{\mu_a A_a}, \text{ como } \mu_0 \ll \mu_a < \mu_c$$

$$\frac{\phi_2 [g_2(x) + l_2]}{A_2} = \frac{\phi_3 g_3(x)}{A_3}$$

Como $l_2 \gg g_2(x) \Rightarrow g_2(x) + l_2 \approx l_2$ e portanto

$$\phi_2 = \frac{g_3(x)}{l_2} \cdot \frac{A_2}{A_3} \phi_3$$

Equação 17

Qualitativamente pode-se verificar algumas relações importantes:

- a) Caso o valor $g_3(x)$ aumente, a fluxo magnético disperso tende a aumentar;
- b) Se o núcleo ferromagnético apresentar um volume muito maior que as dimensões da área A_3 , o fluxo disperso tende a aumentar.
- c) Aumentando-se o comprimento l_3 aumenta-se o fluxo disperso.

Nestes casos, o aumento da relutância no “fluxo principal” tornou o “fluxo disperso” uma via alternativa ao campo magnético. Quanto maior a diferença entre as áreas, maior a tendência à formação de campo magnético disperso.

2.8. Segunda Proposta Para Investigar a Relação Entre Intensidade de Corrente (I) e Espessura de Entreferro (g(x))

O sistema da FIG. 21, representa uma Ponte de Wheatstone formada por dois resistores de mesmo valor. Obtendo-se a voltagem $V_0(t)$ em função de $V(t)$.

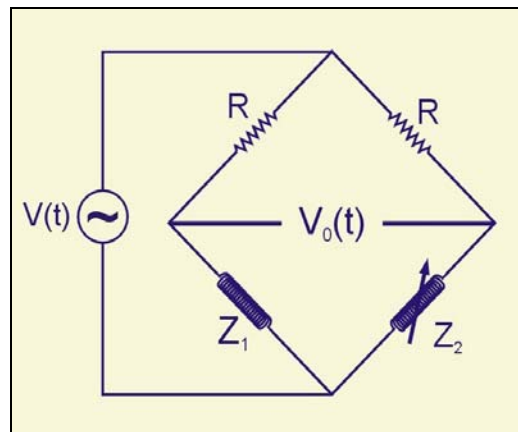


FIG. 21: Circuito tipo ponte de Wheatstone formado por dois resistores e dois indutores

$$V_0(t) = V(t) \left[\left(\frac{R}{R + Z_1} \right) - \left(\frac{R}{R + Z_2} \right) \right]$$

Como $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L^2)}$

$$V_0(t) = V(t)R \left[\left(\frac{1}{R + (R^2 + (\omega L_1)^2)^{\frac{1}{2}}} \right) - \left(\frac{1}{R + (R^2 + (\omega L_2)^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \right]$$

$$V_0(t) = V(t) \left[\left(\frac{1}{1 + \left(1 + \left(\frac{\omega L_1}{R} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) - \left(\frac{1}{1 + \left(1 + \left(\frac{\omega L_2}{R} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right) \right] \quad \text{Caso } \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2 \gg 1$$

$$V_0(t) = V(t) \left[\frac{1}{\frac{\omega L_1}{R}} - \frac{1}{\frac{\omega L_2}{R}} \right] \Rightarrow V_0(t) = \frac{V(t)R}{\omega} \left[\frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2} \right]$$

Utilizando a Equação 13, na relação anterior obtém-se:

$$V_0(t) = V(t) \left[\frac{2g_1(x)}{N^2 A \mu_0} - \frac{2g_2(x)}{N^2 A \mu_0} \right] \Rightarrow V_0(t) = \frac{2V(t)R}{\omega N^2 A \mu_0} [g_1(x) - g_2(x)]$$

Caso $g_1(x) = g_2(x_0) + \Delta g(x)$, e $g_2(x_0)$ seja mantido constante (referência):

$$V_0(t) = k V(t) \Delta g(x)$$

Equação 18

É fácil verificar que a voltagem $V_0(t)$ é diretamente proporcional a variação da espessura de entreferro $g_1(x)$.

Capítulo 3: Materiais e Método

3.1. Estrutura Geral

A pesquisa de transdutores magnéticos⁷ (com sensibilidade para carbetos em matrizes não magnéticas) progrediram à medida que iam sendo descobertas propriedades na liga HP40. De forma esquemática estas análises encontra-se estruturada na FIG. 22.

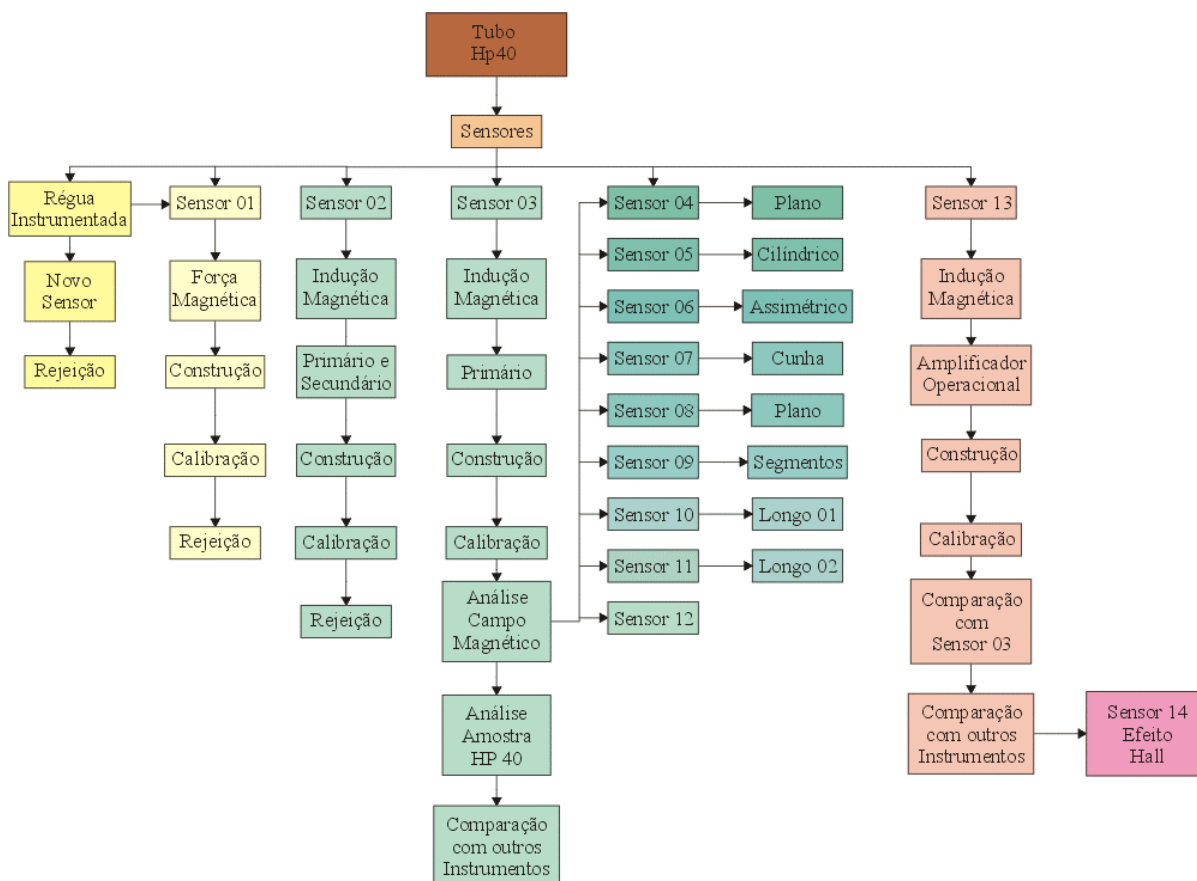


FIG. 22: Diagrama esquemático deste trabalho

3.2. Caracterização do Problema

O transdutor magnético deve distinguir claramente a região cementada. Porém, esta região não se apresenta de forma uniforme, exigindo uma avaliação que satisfaça critérios de aplicação, restringindo-se a espessura crítica de camada cementada. Desta forma, caracterizar as espécies metálicas, no que se refere à atividade magnética, torna-se fundamental.

⁷ Preferiu-se utilizar a palavra **Transdutor** ao invés de **Transdutor Transdutor** por questão de simplicidade

3.3. Projeto de Transdutores

Este estudo foge do tradicional por não contar com bibliografia específica. Por ser um aparelho comercial encontra-se envolto em segredos industriais o que dificulta a divulgação de conhecimentos. Deve-se então, pesquisar as características físico-magnéticas da amostra e, a partir destas características, escolher o melhor princípio a ser empregado. Desta forma, não é de se estranhar as várias alterações de princípio de funcionamento dos transdutores sofridas durante o trabalho. O critério de escolha estar baseado em dois pontos: sensibilidade do instrumento e viabilidade de aplicação em campo. Transdutores precisos que demandem instrumentação sofisticada, devem ser evitados. Por esta razão, iniciou-se o estudo com aparelhos de mercado, facilmente encontrado em qualquer região do país. O transdutor deve apresentar sensibilidade suficiente para distinguir cementação entre 45% a 50%, espessura crítica para o colapso.

3.4. Construção de Transdutores

3.4.1. Interação Força Magnética e Amostras

Força magnética gerada por ímãs fixos é de difícil determinação teórica, quando não impossível. Seu modelamento teórico é inexatidão, uma vez que os parâmetros de contorno (massa magnética efetiva e homogeneidade estrutural), em geral são desconhecidos. Desta forma, a determinação experimental de linhas de indução torna-se essencial ao desenvolvimento do trabalho. Para esta finalidade foram empregados métodos específicos de estudo:

(a) criação de transdutores com geometrias diversificadas e (b) mapeamento de campo magnético através de pó magnético, semelhante à norma NACE Standard TM0498-98 empregada neste trabalho.

3.4.2. Gabarito de Espessura de Entreferro

As características magnéticas encontradas na liga HP40 levaram a construção de um transdutor de curto alcance (20 mm), capaz de indicar em uma pequena área a porcentagem cementada de material. Como a distância entre transdutor e material ferromagnético é a fonte preponderante de incerteza, criou-se um gabarito de distância, capaz de medir com precisão a espessura de entreferro $g(x)$ em função da posição ocupada sobre o gabarito. Este aparelho é apresentado na FIG. 23.

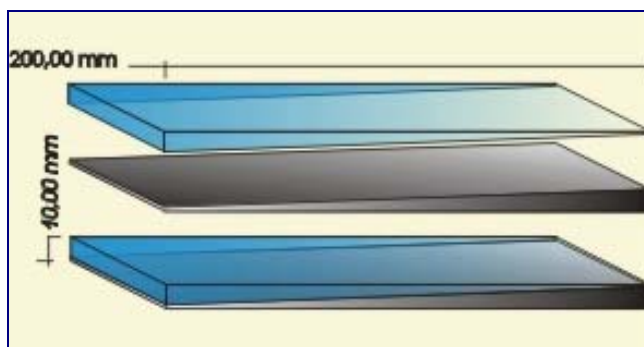


FIG. 23: Desenho do gabarito em duas cunhas justapostas

Construído com duas cunhas transpostas e unidas pelo declive⁸ (uma metálica – ABNT 1030 – e outra de acrílico cristal), apresenta espessura total de 10 mm (entreferro de 1 mm a 9 mm)⁹.

Inicialmente utilizada em bruto, a cunha metálica apresentou anisotropia magnética, sendo por este motivo conduzida a tratamento de relaxamento magnético (aquecimento brando durante três horas a 400°C).

Todas as medidas de posição efetuadas sobre o gabarito seguem o sistema de referência mostrado na FIG. 24.

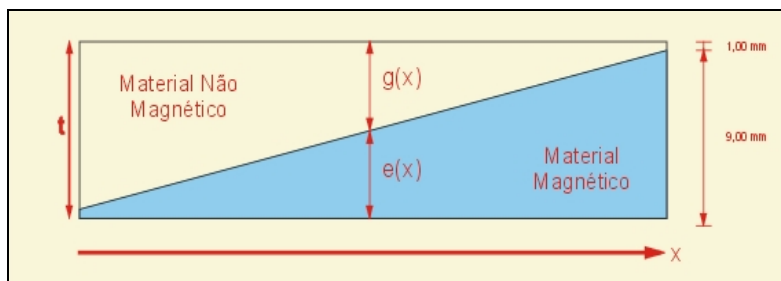


FIG. 24: Referencial sobre o gabarito

Adotando-se como ponto de referência a bordas de maior espessura de entreferro, a relação matemática entre a variável x (distância de um ponto da superfície ao referencial) e $g(x)$ (espessura de entreferro) pode ser expressa por:

Equação 19

$$g(x) = 0,04x + 1$$

⁸ A escolha entre o gabarito em rampa e degraus escalonados, deve-se à uniformidade transversal e variação contínua longitudinal, uma vez que o transdutor foi utilizado nestas direções. Além disso, foi necessário obter informações do comportamento do transdutor quando seus pólos apresentavam espessuras diferentes de entreferro.

⁹ Optou-se pelo metal ABNT 1030 por apresentar comportamento magnético intenso. Uma calibração mais precisa para análise em HP40, deveria conter este material. O único motivo para a não utilização deve-se à dificuldade técnicas encontrada na cementação desta liga.

Devido ao volume de material ferromagnético dos transdutores, os valores de distância utilizados durante os procedimentos de análise foram 20mm, Para auxiliar o posicionamento, foram grafadas linhas paralelas (de 10 mm em 10 mm) sobre a superfície do gabarito.

3.4.3. Régua Instrumentada

A análise da intensidade da força magnética (necessária para o dimensionamento da potência dos indutores), foi obtida instrumentando-se uma lâmina metálica com dois extensores, ligados em meia ponte a um condicionador diferencial de sinais como no esquema da FIG. 25a. Sua principal função foi substituiu um dinamômetro de precisão(FIG. 25b).

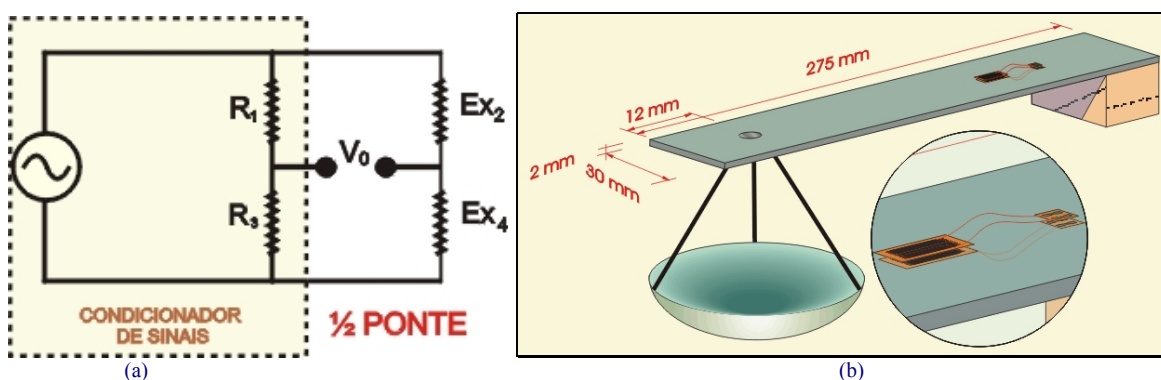


FIG. 25: (a) Esquema de um circuito em meia ponte para extensores Ex_2 e Ex_4 ;
(b) Régua instrumentada. No detalhe, observa-se o posicionamento dos extensores.

A calibração da régua, feita com pesos aferidos, relaciona a alteração de pesos no suporte com valores de voltagem lida no display do condicionador.

3.4.4. Régua Instrumentada sobre o Gabarito

Acoplado um ímã analisador à régua instrumentada (este ímã será usado posteriormente nos transdutores), obteve-se o nível de voltagem no condicionador de sinais em função da posição do ímã sobre a superfície do gabarito. Como a régua é flexível, utilizou-se uma mesa pantográfica, aguardando-se o destaque do ímã da superfície para registrar a medição. Esta operação foi um pouco delicada, uma vez que o gabarito se movia e não a régua (FIG. 26). Este processo não apresenta boa precisão, pois depende da agilidade e acuidade do operador no instante da leitura.

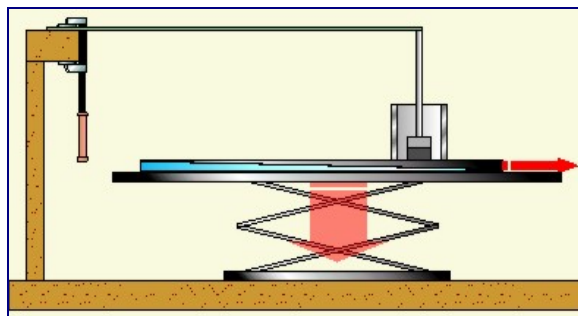


FIG. 26: Calibração da régua instrumentada com o auxílio de uma mesa ajustável pantográfica.

Inicialmente todos os valores de voltagem e corrente elétrica foram medidos em osciloscópios (voltagem pico a pico). Com a necessidade de aumento de precisão nas medidas utilizou-se um multímetro Tektronic, precisão 0,0001 VAC/VDC/RMS.

3.4.5. Transdutor Magnético 01

O *Transdutor Magnético 01* foi construído a partir de um alto falante comercial. Este alto falante foi escolhido após a análise dos valores de força encontrados na régua instrumentada. Extraído o cone acústico (para evitar dissipação de energia), utilizou-se a força gerada no interior das espiras como transdutor de força magnética / corrente elétrica.

Adaptando-se um ímã à haste metálica central foi possível determinar qual a intensidade da força de destaque (necessária para retirar o ímã da superfície em análise), evidenciada pela intensidade de corrente elétrica nos extremos da bobina (FIG. 27); para evitar interferência, deve-se manter afastados ímã analisador e o conjunto magnético da bobina. A orientação da haste, na direção do eixo de oscilação da bobina, é garantida pela estrutura metálica superior. Esta estrutura também ajusta a “posição de zero” da força magnética sobre a superfície analisada.

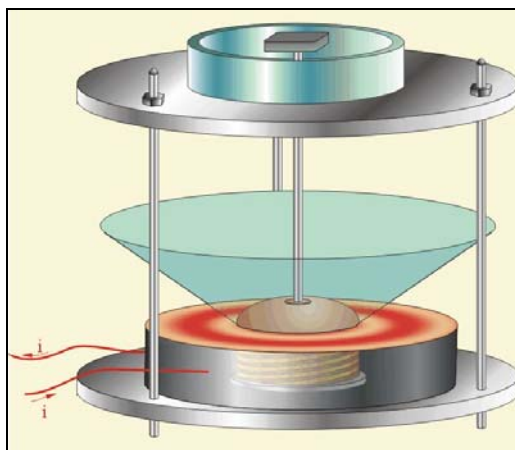


FIG. 27: Construção da estrutura de sustentação da haste e posicionamento do ímã

A força de restituição proveniente do sistema de sustentação da bobina, que se manifestam fora da posição de equilíbrio, impõe um perfeito posicionamento do ímã analisador à superfície da amostra. Parafusos e roscas formam um conjunto com o disco superior, ajustando o ímã na posição de leitura.

A identificação da força como de restituição foi obtida conectado um osciloscópio aos terminais da bobina. Através de um leve toque no cone, mediu-se a variação de voltagem induzida nos terminais.

Uma vez definido o alto-falante para o sistema, procedeu-se a calibração do o Transdutor Magnético 01, colocando-o em posição invertida (FIG. 28). Gradativamente, foram-lhe acrescentados pesos aferidos enquanto eram anotados os valores de voltagem e corrente necessários para elevar o conjunto à posição anterior ao acréscimo de peso. Desta forma, obteve-se a curva de transdução *peso x voltagem* para o transdutor.

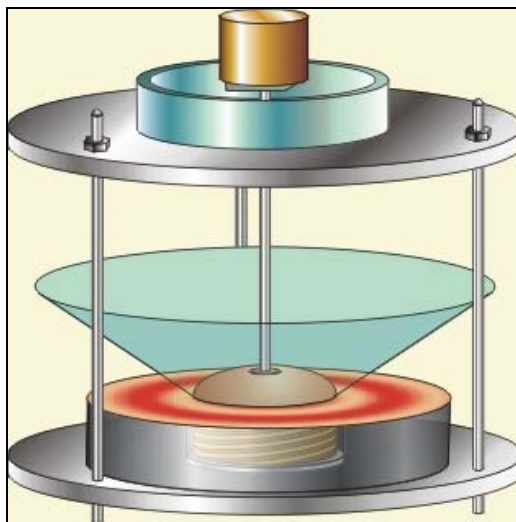


FIG. 28: Calibração do Transdutor 01 com pesos aferidos

A análise de intensidade magnética no gabarito foi executada nas mesmas posições utilizados pela régua instrumentada (FIG. 29).

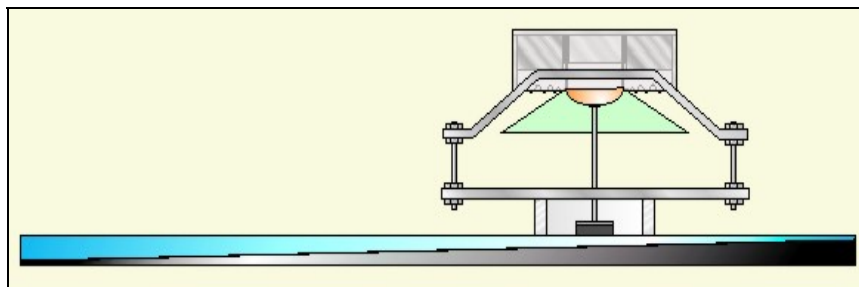


FIG. 29: Transdutor Magnético 01 sobre o gabarito em cunha

Comparando-se as análises feitas sobre gabarito por dois métodos diferentes foi possível verificar uma histerese magnética no metal ABNT 1030, quando campo magnético contínuo e intenso é aplicado (campo gerado por ímã permanente).

Uma rápida inspeção magnética feita sobre a liga HP40 revelou histerese magnética semelhante. Isto produziu modificações profundas no transdutor, uma vez que tornou proibitiva a utilização de campos magnéticos contínuos.

3.4.6. Transdutor Magnético 02

Como tentativa de minimizar a histerese magnética manifestada pelos materiais analisados passou-se a utilizar campo magnético oscilante.

O *Transdutor Magnético 02*, construído a partir de uma fonte de alimentação comercial de 220V/110V, utilizou o princípio de variação de indutância no interior da bobina. A aproximação de materiais ferromagnéticos do núcleo produz variação de voltagem e corrente elétrica nos terminais da bobina, capazes de serem detectados por osciloscópios ou multímetros convencionais.

Comercialmente estes transformadores são encontrados com núcleo laminado em ferro-silício, no formato W/I. Devidamente montados, formam um invólucro ferromagnético em torno das bobinas, permitindo acoplamento eficiente entre suas espiras.

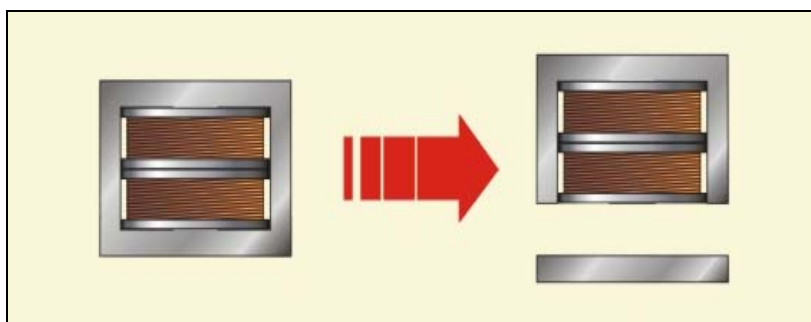


FIG. 30: Montagem do Transdutor 02 a partir de um transformador comercial

A FIG. 30 mostra a modificação realizada no transformador de forma a utilizar as bobinas primárias e secundárias como amplificador de sinais ainda no transdutor.

É importante lembrar que este transdutor apresenta três entreferros voltados para a superfície de inspeção. Isto produz campo magnético disperso, impedindo uma inspeção puntiforme. A grande vantagem em relação ao transdutor anterior é apresentar fluxo magnético variado.

Por tratar-se de fonte de voltagem de baixo custo, não foram encontradas especificações técnicas do transformador. Desta forma, foram levantadas as curvas características do indutor:

- o número de espiras de cada segmento da bobina (enrolando-se 10 voltas sobre o indutor e medindo, por indução a voltagem induzida em cada segmento);
- a indutância de cada segmento da bobina (pela montagem de um *circuito RL*).

3.4.7. Transdutor Magnético 02 sobre o Gabarito

Inspecionando o gabarito em cunha com o *Transdutor Magnético 02* obteve-se a função de transferência voltagem de saída versus espessura de entreferro.

Na FIG. 31 o Transdutor Magnético 03 encontra-se posicionado transversalmente ao comprimento do gabarito.

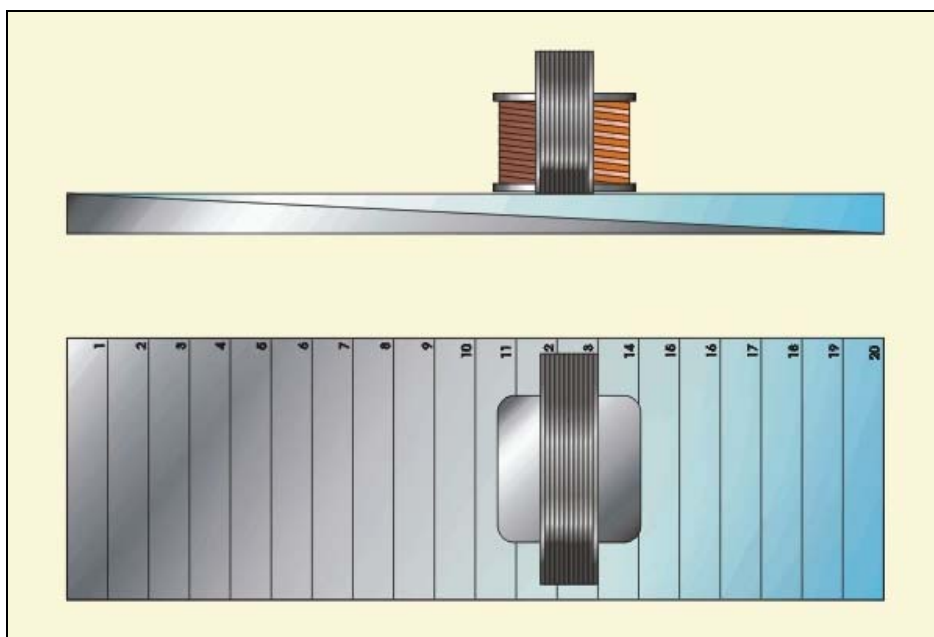


FIG. 31: Transdutor Magnético 02 sobre o gabarito em cunha

A melhor faixa de sensibilidade foi determinada, repetindo-se o procedimento para frequências entre 80 Hz e 4kHz. Dois instrumentos foram empregados: multímetros (medidas RMS) e osciloscópios (medidas pico a pico).

3.4.8. Transdutor Magnético 03

O *Transdutor Magnético 02*, com três entreferros, apresentou o sério inconveniente de criar um campo magnético disperso, restringindo a inspeção a grandes superfícies. Modificou-se o núcleo para o formato em U, contendo apenas dois entreferros (FIG. 32).

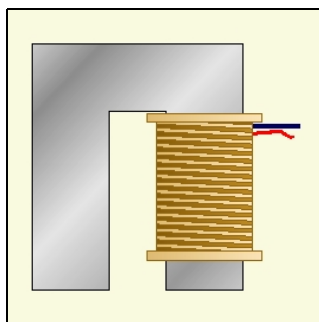


FIG. 32: Montagem do Transdutor Magnético 03 com dois entreferros

Pela grande semelhança estrutural apresentada entre os dois últimos transdutores, foram encontrados resultados semelhantes no gabarito em cunha. Valores de voltagem e corrente foram obtidos de acordo com a posição do transdutor sobre o gabarito. Até o momento o metal utilizado foi exclusivamente o ABNT 1030.

3.4.9. Mapeamento do Tubo HP40

Após torneamento, um tubo cementado da classe HP40 foi mapeado como o apresentado na FIG. 33. As coordenadas “circunferenciais” acompanham o perímetro enquanto as coordenadas “longitudinais”, o comprimento do tubo. As linhas tracejadas longitudinais e circunferenciais estão separadas de 20 mm.

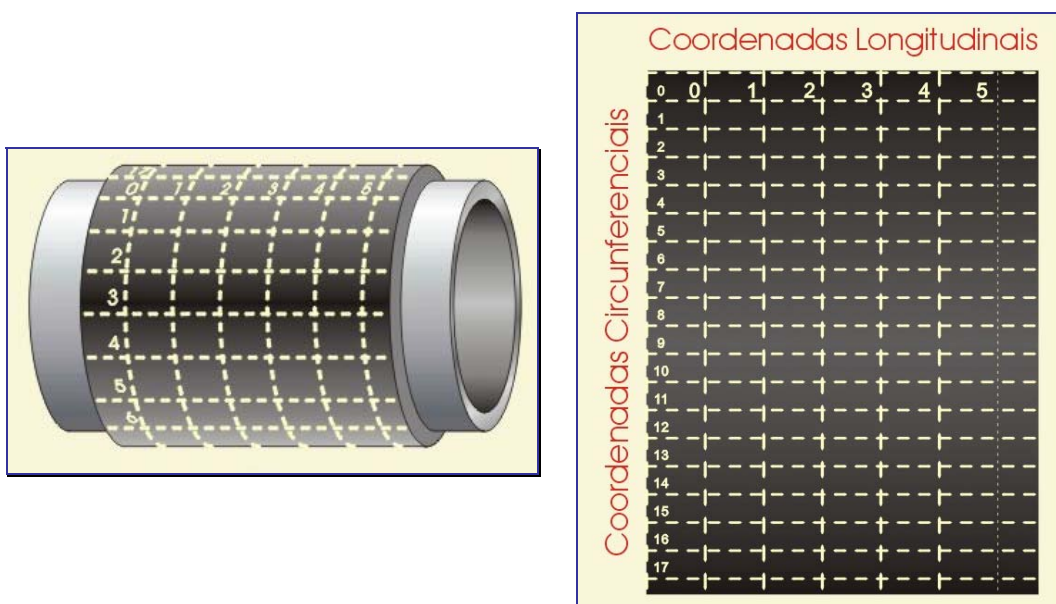


FIG. 33: Sistema de coordenadas adotados para o mapeamento da superfície do tubo

Os transdutores utilizados apresentavam uma grande quantidade de conexões impedindo fácil manuseio. Para aumentar a mobilidade, foi criado um suporte com apoios rolantes, mostrado na FIG. 34.. Linhas longitudinais e circunferenciais foram traçadas de 20 mm em 20 mm por causa das dimensões dos entreferros dos transdutores. Por esta razão cada valor de voltagem e corrente elétrica expressa as condições de cementação em uma área não menor que 400 mm^2 .

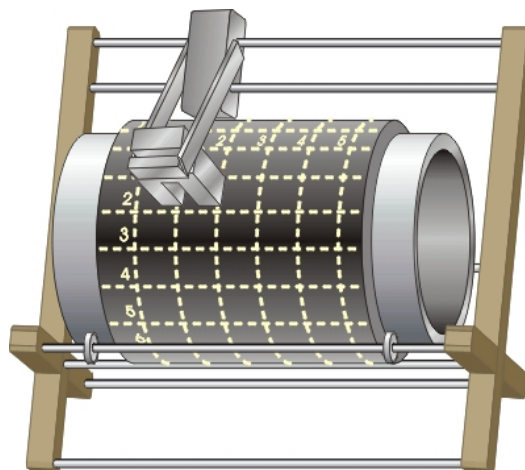


FIG. 34: Transdutor Magnético 03 no suporte de inspeção de tubos.

Como o transdutor apresenta duas posições de leitura, necessitamos de outra coordenada de orientação do transdutor sobre o tubo, definido na FIG. 35. Quando os entreferros do transdutor se encontrarem paralelo à geratriz do tubo o sentido será *sentido paralelo*, e quando transversal, *sentido transversal*

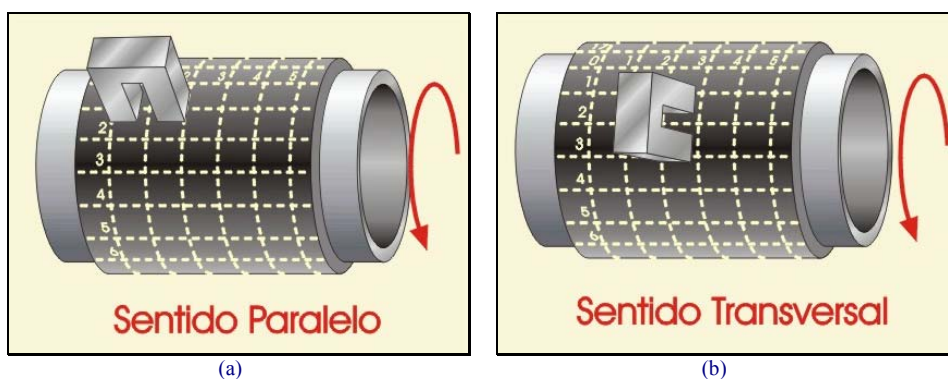


FIG. 35: Orientação do transdutor sobre o tubo (a) Sentido paralelo (b) Sentido Transversal.

O acoplamento do transdutor à superfície é primordial para a análise. A forma laminada dos núcleos de ferro-silício se amolda perfeitamente ao sentido paralelo. Porém o método se mostrou ineficiente ao sentido longitudinal. Por esta razão passou-se a utilizar “encostos” de EVA que mantem o transdutor sempre à mesma distância da amostra, com melhor acomodação.

3.4.10. Estudo da Dispersão do Campo Magnético nos T.M. de 04 a 12

Algumas análises feitas com o *Transdutor Magnético 03* indicaram a apresenta de campo magnético não uniforme. O estudo do comportamento das linhas de campo magnético foi executado com a construção de transdutores, de natureza e forma diferentes. A geometria dos *Transdutores 04 a 12* são apresentadas na FIG. 36.

Os *Transdutores Magnéticos 04 a 07* apresentam núcleo em ferrite e área de contato diversificada. Apesar da ferrite ser um material empregado em altas frequências analisou-se em baixa, com pequena intensidade de corrente elétrica baixa. Modificou-se também, a forma e o posicionamento da bobina excitadora no núcleo.

A penetração do campo magnético em películas metálicas foi estuda com o *Transdutor Magnético 07*. Cobriu-se a superfície acrílica do gabarito em cunha com uma película metálica e realizou-se à inspeção.

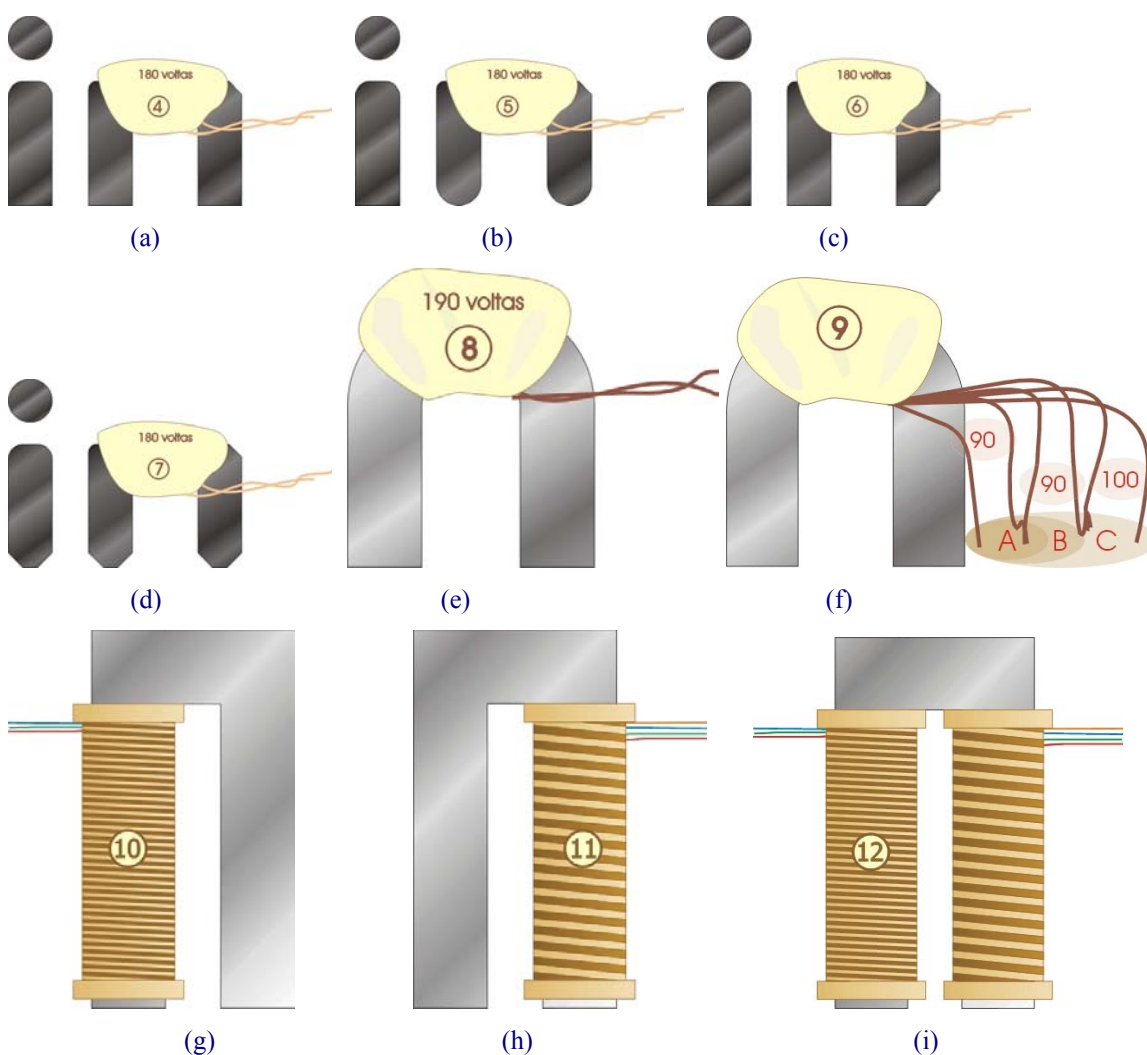


FIG. 36: Estudo do campo disperso nos transdutores através de sua geometria

Até o momento nenhum transdutor apresentou linearidade entre a grandezas espessura de entreferro e sinal elétrico (voltagem ou corrente). Por este motivo empregou-se o método de linearização mais utilizado em instrumentação: *ponte de Wheatstone*. Este método utiliza corrente de baixa intensidade, mostrando-se mais adequado às condições de trabalho.

3.4.11. Transdutor Magnético 13

Os últimos transdutores utilizaram corrente alternada, forçando o uso de multímetros de alta precisão como indicador. Isto inviabiliza a pesquisa em campo. A criação do *Transdutor Magnético 13* visa manter o sistema alternado no elemento sensor, passando a sistema contínuo na leitura.

Constituído de duas bobinas de mesma indutância ligadas em ponte de Wheatstone, encontra-se conectado a um condicionador de sinais e um multímetro convencional de corrente contínua (FIG. 37). Uma das bobinas é mantida como referência enquanto outra será a bobina analisadora. Com a aproximação de um elemento ferromagnético à bobina analisadora ocorrerá variação de indutância e, conseqüentemente, desequilíbrio na ponte. Este sinal amplificado é retificado pelo condicionador e enviado ao multímetro.

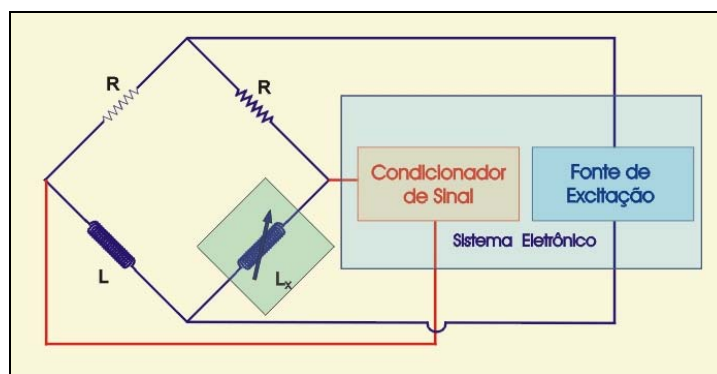


FIG. 37: Transdutor Magnético 13: ponte de Wheatstone e condicionador de sinais

A inspeção do gabarito em cunha apresentou uma relação linear entre voltagem e espessura de entreferro. Quando utilizado sobre o tubo HP40, os dados de voltagem foram comparados com os colhidos pelo *Transdutor Magnético 03*, apresentando boa concordância. Alguns dados apresentaram inconsistência, o que levou a um estudo mais aprofundado da superfície externa (exposta à agressão da atmosfera do forno) e interna do tubo.

Outra propriedade revelada durante as inspeções foi o anisotropismo do transdutor. Quando se invertiam as áreas correspondentes à cada entreferro (numa mesma posição sobre o tubo), eram obtidas medições diferentes. Isto significa entreferos diferentes. O

fato da bobina estar posicionada em uma das hastes do núcleo de ferro-silício distorce o campo nesta região. Posicionada simetricamente aos pólos (FIG. 38) o transdutor tornou-se isotrópico mas com perda substancial de sensibilidade.

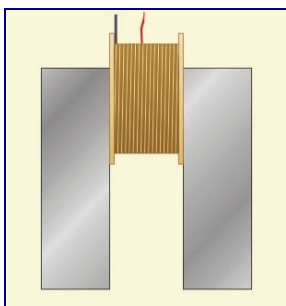


FIG. 38 Transdutor Magnético 13 com simetria axial em relação à bobina

3.4.12. Transdutor Kubota

Após estudar diversos *Transdutores Magnéticos* aquele de melhor desempenho foi comparado com um transdutor comercial fabricado pela Kubota Corporation. A FIG. 39 apresenta uma representação do Transdutor Kubota até o ponto onde se pode pesquisa-lo.

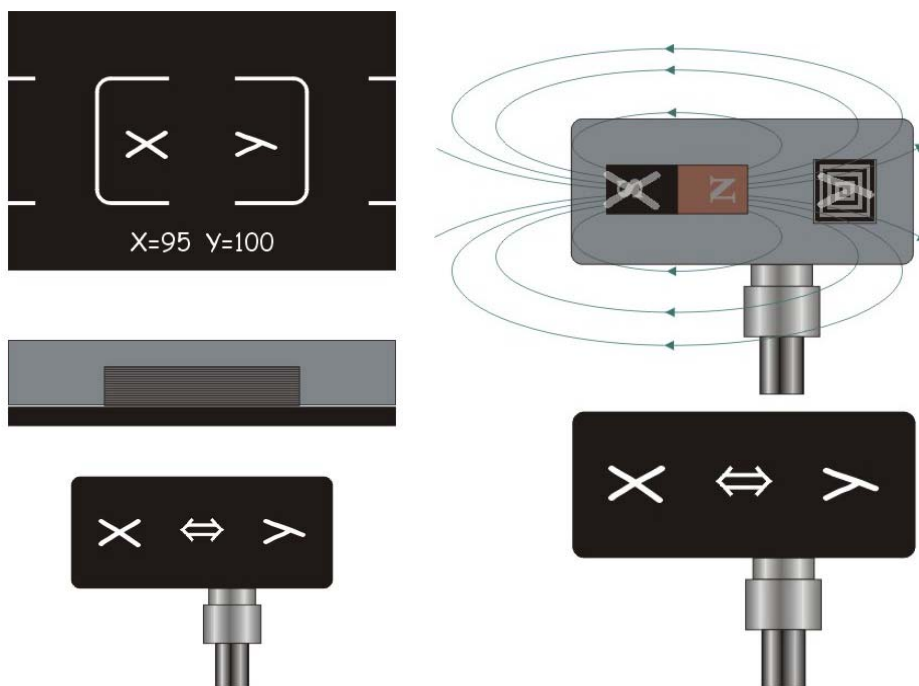


FIG. 39: Representação do Transdutor Kubota

Capítulo 4: Resultados e Discussão

4.1. Caracterização das Espécies Inspecionadas

4.1.1. Liga da Classe HP40

A liga fundida austenítica HP40Nb estudada, tem uma composição típica semelhante a TABELA 1:

TABELA 1: Composição química (% em peso) da liga.

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Nb	Ti + Zr
0,45	< 1,5	< 2,0	< 0,03	< 0,03	32 - 35	23 - 27	< 1,5	traços

Amostras novas (tubo sem operação), mostram uma estrutura dendrítica com matriz austenítica e precipitados interdendríticos. Analisada em microscopia eletrônica de varredura e em microsonda EDS, mostradas na FIG. 40 observou-se presença de C, Si, Cr, Ni, Fe e Nb como já era esperado devido a própria classe do material (HP40).

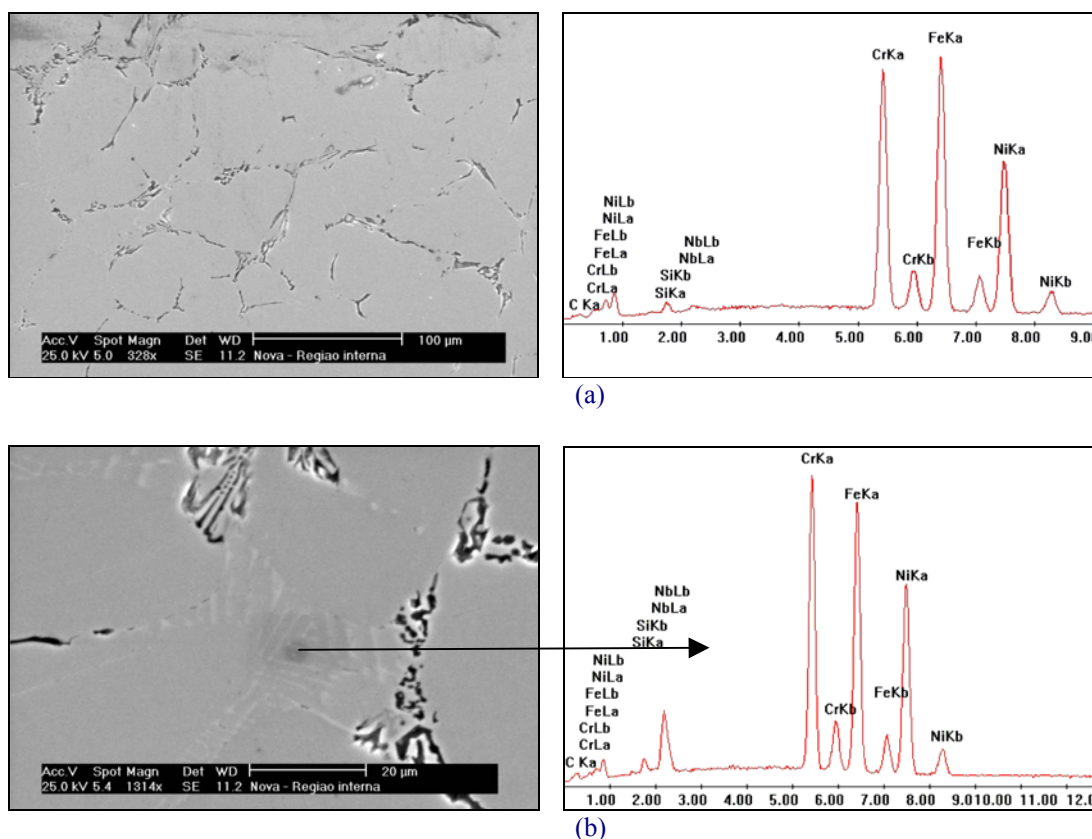


FIG. 40: Amostra nova. Caracterização microestrutural em microscopia eletrônica de varredura, e microanálise em microsonda EDS das respectivas regiões. Em (a) uma caracterização geral e em (b) dos precipitados interdendríticos.

Já nos precipitados, que apresentam uma morfologia de “escrita chinesa”, foram detectados presença de O, Si, Cr, Ni, Fe e Nb.

Como podem ser observadas, as regiões interdendríticas estão enriquecidas com os elementos de liga do material. Tem-se maior presença de Cr e um pico acentuado de Nb. Segundo a literatura, esta região seria composta por carbonetos complexos do tipo MC (mais especificamente precipitados no contorno de grãos do tipo $M_{23}C_6$, onde M seriam átomos de Cr e alguns de Fe).

Amostras que tiveram um regime de trabalho de 37.000 horas, apresentam uma microestrutura também de matriz austenítica, com precipitados interdendríticos.

Próximo a superfície externa do tubo, observa-se a presença associada de precipitados de coloração mais escura com outros de coloração clara, FIG. 41a. Nestes precipitados claros detectou-se a presença de elevados teores de Si e Nb, enquanto que os precipitados escuros o elemento preponderante é o Cr. Mais para o centro e em direção a superfície interna do tubo, estes precipitados claros diminuem gradativamente dando lugar aos precipitados escuros. Também nestas amostras foram detectados precipitados ricos em Nb de coloração praticamente branca, FIG. 41b.

Próximo a superfície interna observa-se forte degradação do material, com a presença de precipitados ricos em oxigênio, silício e alumínio (provavelmente sílica e alumina). Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de que o Cr existente nesta região difunde para a superfície para a formação e crescimento da camada de óxido de Cr. Desta forma a matriz subsuperficial fica empobrecida de Cr para formação da rede de carbonetos observada no restante da seção do material.

Apesar de mencionada, *não é objetivo deste trabalho a caracterização da liga frente à difusão do carbono*. Esta liga vem sendo pesquisada em maior detalhe neste departamento pelo Prof. Luciano Volcanoglo Biehl em sua tese de doutoramento.

A união dos dois trabalhos poderá viabilizar o estudo do processo de manutenção de fornos de pirólise, estabelecendo critérios objetivos para otimizar o tempo de troca de cada segmento de tubo.

As verificações futuras do grau de acuidade dos transdutores só poderão ser obtidas definindo com precisão as regiões cementadas na amostra. Técnicas não magnéticas devem ser empregadas como método de comparação

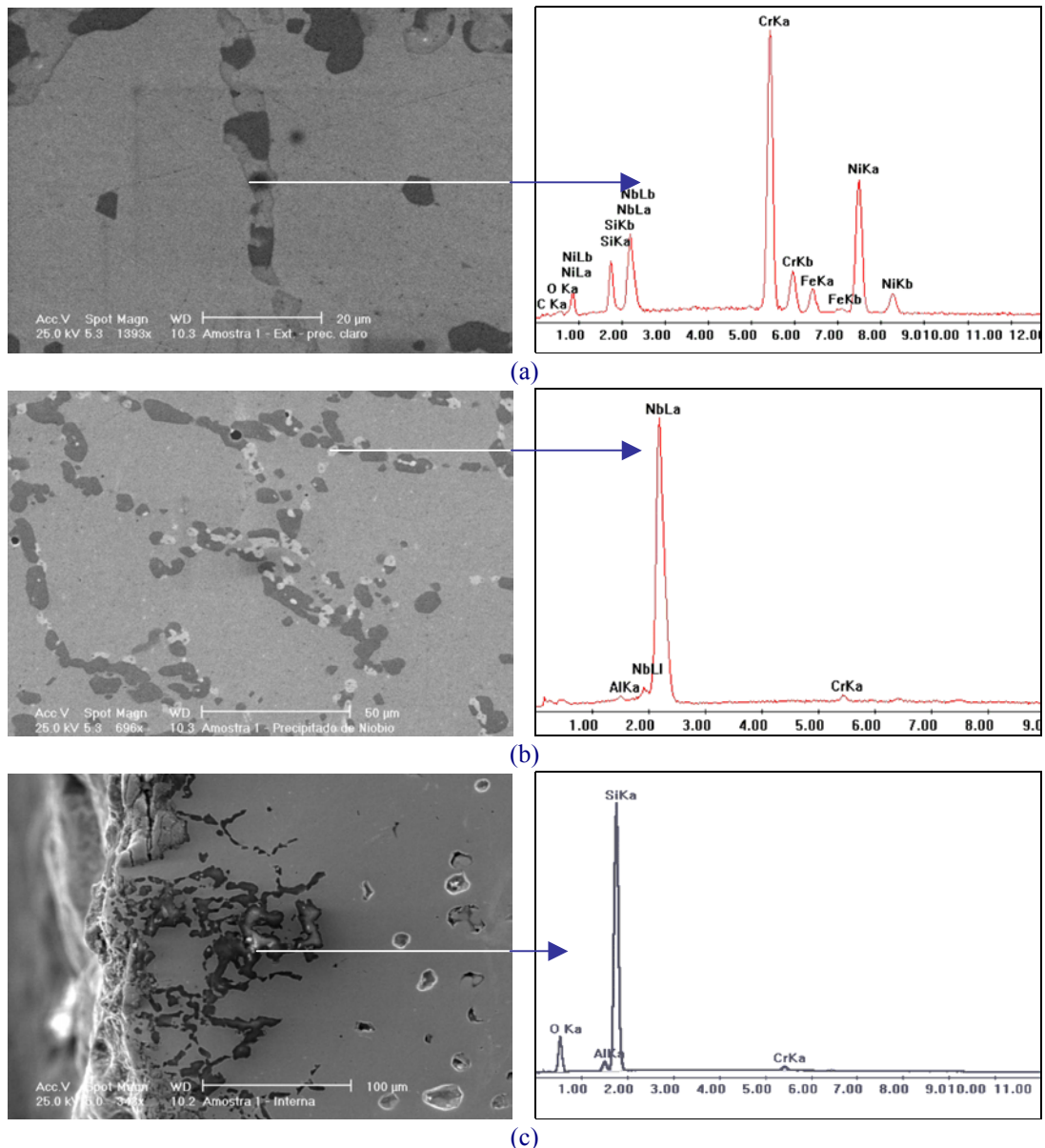


FIG. 41: Caracterização de uma amostra que operou aproximadamente 37.000 horas. Presença de diferentes precipitados. Sem ataque.

A primeira técnica escolhida foi deposição de pó magnético sobre a peça:

Nace Standard TM0498-98 – Section 3 (Adaptada):

1. Secionam-se transversalmente as porções significativas do tubo (linhas traçadas no sentido circunferencial da FIG. 33);
2. Realiza-se polimento em uma das superfícies da seção até grid 600;
3. Realiza-se acabamento uniforme convencional à outra superfície;
4. Adapta-se à superfície a ser analisada uma folha de papel sulfite 75 g/m²;
5. Aplica-se um forte campo magnético na face oposta à inspeção, de forma a criar um campo magnético através das regiões ferromagnéticas da amostra;

6. Aplica-se pó magnético sobre a folha de papel, registrando as regiões cementadas através de fotografias;
7. Procede-se um trabalho artesanal de traçar a lápis as regiões ferromagnéticas (não contida na norma).

Um dos diagramas do perfil de cementação encontrado em uma seção transversal do tubo, obtidos através de deposição de pó magnético, é mostrado na FIG. 42.

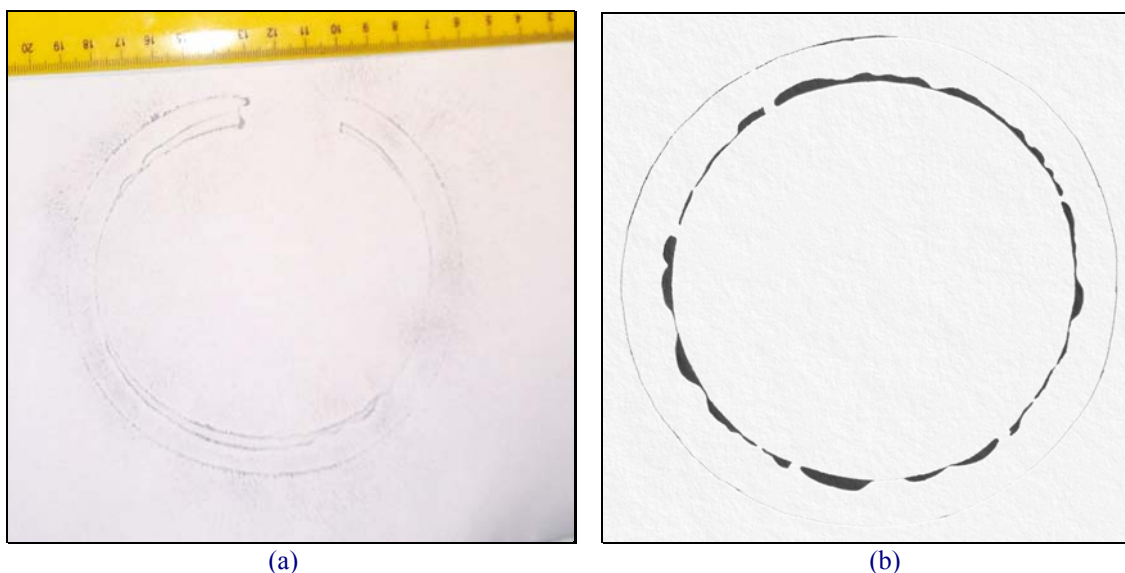


FIG. 42: (a) Ensaio com partícula magnética empregado sobre seção transversal de tubo HP40
(b) Diagrama esquemático reproduzido em papel vegetal

A segunda técnica adotada foi ataque químico sobre carbetto:

Nace Standard TM0498-98 – Section 4:

1. Seciona-se transversalmente uma porção significativa do tubo (linhas traçadas no sentido circunferencial);
2. Realiza-se polimento em uma das superfícies da seção até grid 600;
3. Realiza-se ataque químico. A solução de ataque pode ser uma mistura de 20 % em peso de ácido nítrico (HNO_3) e 4 % em peso de ácido fluorídrico (HF). Esta solução deve ser recentemente preparada, usando técnicas e procedimentos normais de laboratório, incluindo as precauções apropriadas de segurança. Para atingir a concentração acima, misturar 200 cm^3 de HNO_3 de concentração 70 % com 70 cm^3 de HF de concentração 49 % e 670 cm^3 de água destilada;
4. A região cementada deve ser registrada através de fotografias.

Um dos diagramas de perfis de cementação, obtido por ataque químico encontra-se na FIG. 43a. As regiões circuladas apresentam difusão de carbono à matriz pelo rompimento da camada de óxido protetor. Estas regiões têm forte característica ferromagnética, sendo detectada por transdutores magnéticos.

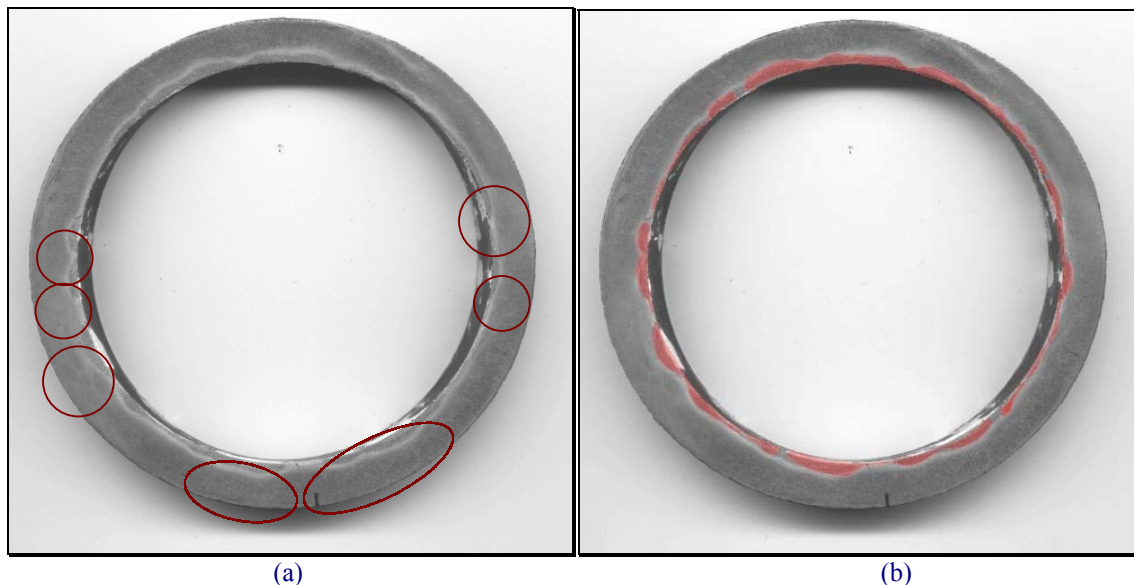


FIG. 43: (a) Diagrama de cementação conseguido por ataque químico sobre carbeto. Os círculos evidenciam difusão de carbono para o interior da matriz pelo rompimento do óxido protetor. (b) Diagrama esquemático evidenciando resultados de ensaio por partícula magnética sobreposto à técnica de ataque químico sobre carbeto

Quando sobrepostas, as duas técnicas (pó magnético e ataque químico) observa-se perfeita coincidência (FIG. 44a e FIG. 44b).

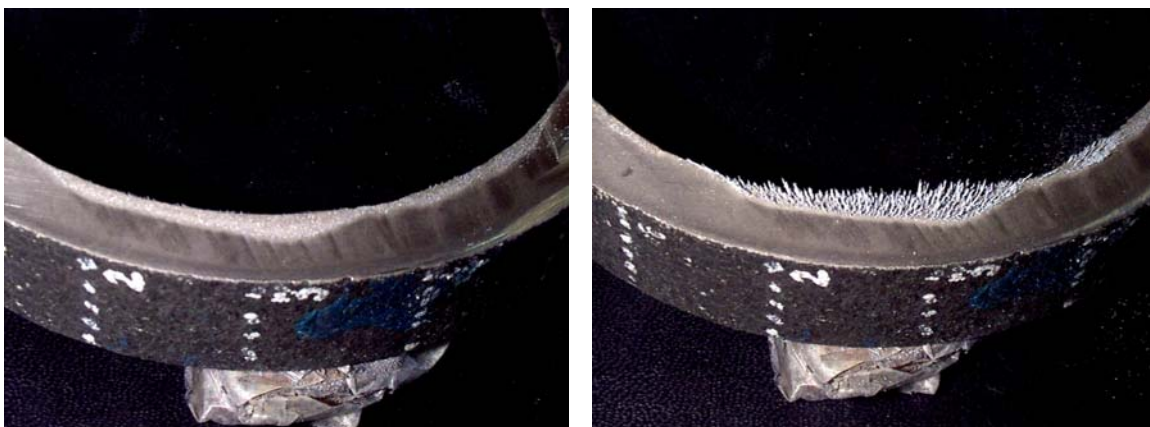


FIG. 44: Partícula magnética depositada diretamente sobre a peça já atacada quimicamente.

4.2. Transdutor Magnético 01

O alto-falante empregado, apresenta um sistema de sustentação que permite à bobina oscilar em torno de uma posição de equilíbrio. As forças que aí atuam têm características elásticas, atuando em qualquer posição fora da elongação mínima (posição de equilíbrio) podendo interferir no valor da medida da intensidade de força magnética.

Esta força de restituição elástica, pode ser examinada pela indução causada pelo movimento de uma bobina no interior de um campo magnético constante, descrita pela lei de Lenz. A força contra-eletromotriz induzida na bobina é proporcional a variação do fluxo magnético em seu interior, indicado na Equação 20

$$V_{\text{ind}} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Equação 20}$$

onde V_{ind} é a força eletromotriz, N número de espiras e $d\Phi/dt$ a variação do fluxo.

O gráfico de voltagem versus tempo revela um movimento harmônico amortecido, cujas características são reconhecidamente de uma força dissipativa de restituição elástica. Como o campo magnético é constante em módulo, a variação de fluxo se fará pela variação de posição, ou velocidade instantânea dx/dt . A maior intensidade de velocidade é atingida na posição de menor energia potencial, ou seja, no ponto de elongação mínima.

Acoplado-se um osciloscópio aos terminais da bobina, obtém-se valores máximos e mínimos de voltagem através de cursor flutuante contido no osciloscópio. Estes valores são apresentados na TABELA 2 e representados nas FIG. 45a e FIG. 45b.

TABELA 2: Variação máxima e mínima de voltagem nos terminais da bobina ao ser acionada.

Massa: 15 gramas			Massa: 26 gramas		
t (ms)	$V_{\text{máx}}$ (mV)	V_{min} (mV)	t (ms)	$V_{\text{máx}}$ (mV)	V_{min} (mV)
0,0	776	720	0,0	384	400
23,8	456	256	30,8	240	208
47,6	286	120	61,6	136	96
71,4	144	64	92,4	80	56
95,2	96	56	123,2	32	16
119,0	48	40			
142,8	40	16			
166,6	16	14			
$V(t) = 785,68e^{-0,0226t}$			$V(t) = 424,97e^{-0,0197t}$		
$R_2 = 0,9915$			$R_2 = 0,9827$		

É importante frisar que nas curvas contidas na FIG. 45, valores máximos e mínimos de voltagem não representam máximas e mínimas elongações, mas velocidades. As indicações na FIG. 45 referem-se às frequências e períodos contidos nos gráficos.

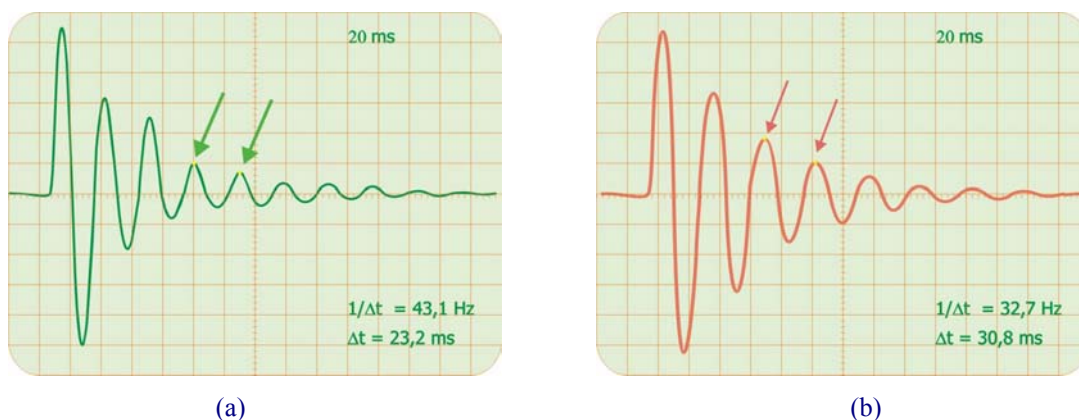


FIG. 45: Oscilação de voltagem na bobina do alto falante quando sujeita a massa de (a) 15 gramas e (b) 26 gramas

Embora, a massa registrada na TABELA 2 não represente a massa total oscilante, sua variação fornece informações qualitativas do comportamento do sistema.

As FIG. 46a e FIG. 46b são geradas a partir dos dados contidos na TABELA 2. Como podem ser observados, pesos de 15 gramas e 26 gramas provocaram aumento de período, mostrando concordância teórica com osciladores harmônicos.

Uma vez comprovada a característica elástica da força exercida pela estrutura dinâmica que sustenta a bobina é desnecessário um aprofundamento maior no comportamento cinético do sistema uma vez que todas nossas análises se farão em regime estático.

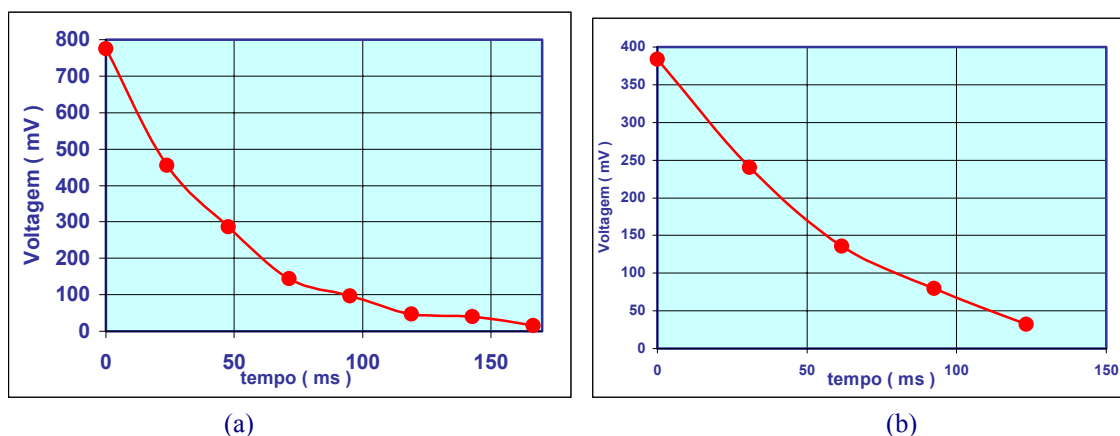


FIG. 46: Valores máximos de voltagem em função do tempo para um carregamento de (a) 15 gramas e (b) 26 gramas.

4.2.1. Equilíbrio de Forças no Momento da Medição

A interação entre o ímã analisador e o elemento ferromagnético contido na amostra resulta em mútua atração. Se for aplicada uma força em sentido oposto à de interação, nenhum movimento ocorrerá até que seja atingido o ponto limite de equilíbrio (FIG. 47a). Neste ponto, as forças serão, em módulo, praticamente iguais. Se a força oposta for aquela produzida pela bobina, pela intensidade de corrente elétrica, será possível medir a intensidade da força magnética.

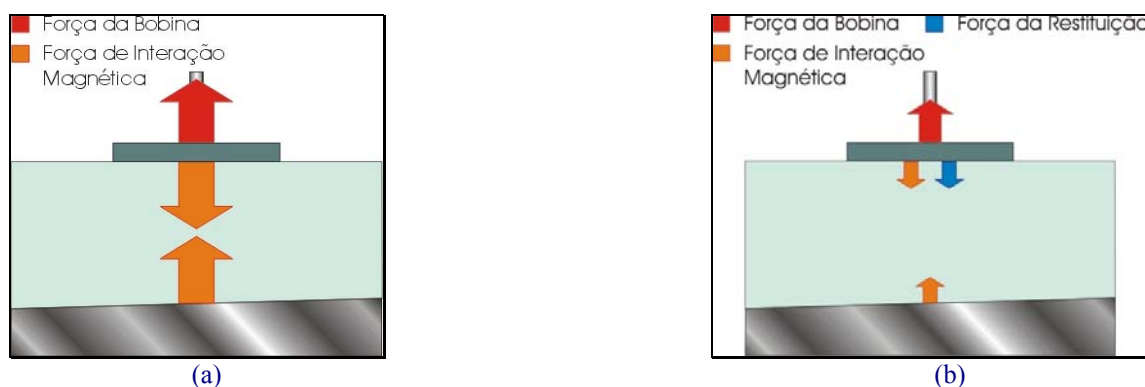


FIG. 47: Quando as forças magnéticas são intensas, (a) as forças de restituição são, relativamente, desprezíveis. Porém quando fracas, (b) as forças de restituição são semelhantes, interferindo nas medidas.

Este limite de equilíbrio é facilmente detectável enquanto as interações são elevadas. Porém, como a força magnética diminui rapidamente com a distância, a força de restituição elástica pode mascarar a medida de força da bobina principalmente em intensidade da interação muito pequena. A FIG. 47b apresenta um esquema desta situação. Quando a intensidade da força exercida pela bobina é grande (FIG. 47a), a força de restituição elástica é imperceptível. Porém, quando pequena (FIG. 47b), a força de restituição compete com a força da bobina em intensidade, alterando o resultado final da medida.

4.2.2. Régua Instrumentada

Um projeto de transdutor magnético deve apresentar dispositivo capaz de medir a exatidão do instrumento, ou seja, a correspondência perfeita entre a medida realizada pelo transdutor e o padrão estabelecido para a grandeza. Esta propriedade geralmente é aferida, comparando-se dois transdutores que meçam a mesma grandeza sobre princípios distintos de funcionamento. Construiu-se para esta finalidade um transdutor de força, baseado na elasticidade de uma barra metálica. Instrumentada com extensômetros elétricos, serviu para determinar intensidade da força magnética necessária para a escolha do alto-falante dos

transdutores. Não foram utilizados dinamômetros de mola por não apresentarem suficiente precisão.

A calibração da régua instrumentada foi realizada com o acréscimo gradativo de massas até o limite de 500 g. Estes valores pode ser encontrados na TABELA 3.

TABELA 3: Valores de peso x voltagem na régua instrumentada

Condicionador de Sinais		
Massa (g)	Peso (kgf)	ddp (mV)
100	0,1	297
200	0,2	593
300	0,3	888
400	0,4	1196
500	0,5	1546
$F_R = 0,3261v + 4,322$ $R^2 = 0,999$		

A curva mostrada no gráfico da FIG. 48, representa a função de transdução força da régua em função da voltagem¹⁰ ($F_R \rightarrow v$), linear em toda a faixa de variação de força. A curva de tendência em mínimos quadrados é dada por:

$$F_R = 0,3261v + 4,322$$

Equação 21

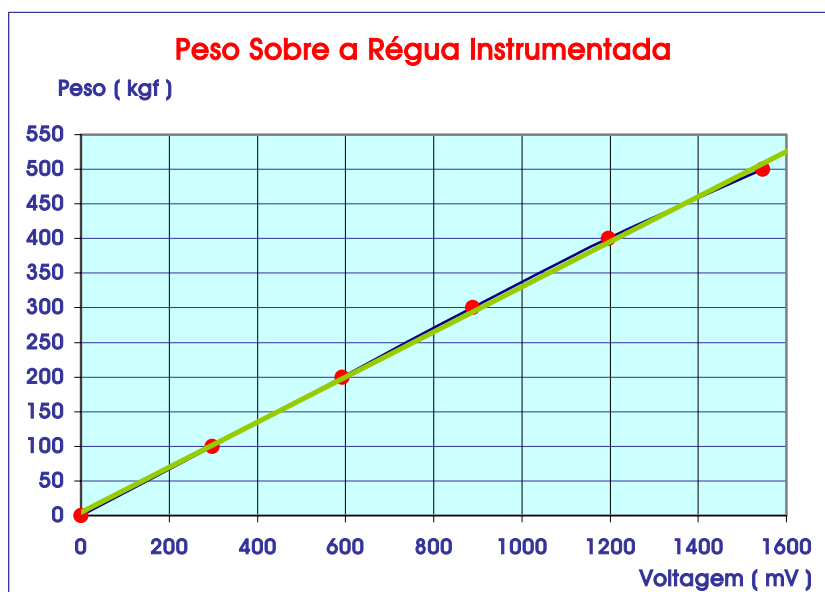


FIG. 48: Calibração da régua instrumentada com pesos aferidos.

¹⁰ Ou função de transferência

Acoplado-se o ímã analisador à régua instrumentada e deslocando-o sobre o gabarito, é possível obter valores de voltagem para cada posição sobre a superfície. Como a régua registra valores de voltagem pela deflexão, o gabarito foi acoplado a uma mesa pantográfica, indicada na FIG. 49.

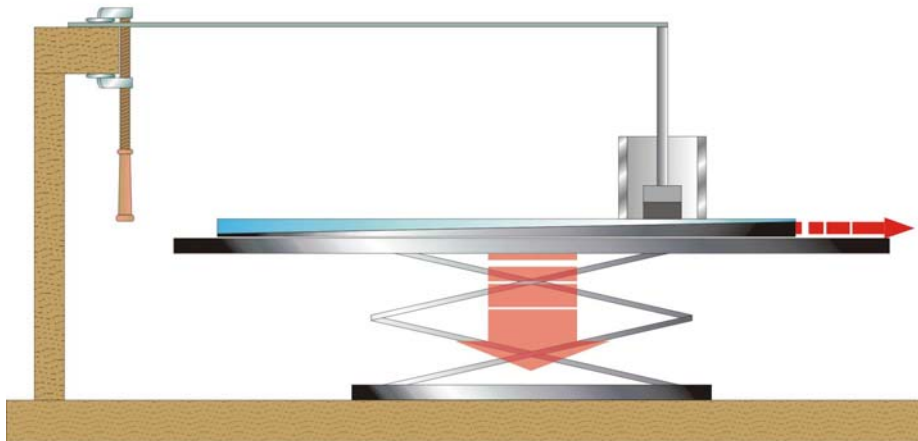


FIG. 49: Mesa pantográfica com gabarito e régua instrumentada.

Iniciando na altura onde a régua não apresente deflexão, gradativamente se baixa a plataforma da mesa, até um mínimo onde ocorre o destaque do ímã da superfície do gabarito. Neste momento (do destaque), registra-se o valor de voltagem. É evidente que esta operação depende da agilidade do operador em registrar, no momento exata, a voltagem.

É importante salientar que a obtenção da relação entre força magnética e espessura de entreferro passa por diversas funções de transdução:

$F_M(F_P)$	$F_M \rightarrow F_R$	Força magnética em função da força régua
$F_R(v)$	$F_R \rightarrow v$	Força régua em função da voltagem (pesos)
$v(x)$	$v \rightarrow x$	Voltagem em função da distância
$x(g)$	$x \rightarrow g$	Distância em função da espessura
$F_M(F_P(v(x(g))))$	$F_M \rightarrow g$	Força Magnética em função da espessura

Para obter-se a função de transdução $v(x)$ basta inspecionar o gabarito com um ímã fixo à régua instrumentada e determinar o valor exato da força de destaque. O magneto utilizado tem 26 g de massa.

A TABELA 4 apresenta valores de voltagem proporcionais à força de destaque, lidos no condicionador de sinais modelo FT CC NI 1094.

TABELA 4: Valores de voltagem no condicionador de sinais em função da distância sobre o gabarito

Régua e Condicionador de Sinais									
ddp em mV	Distância x sobre o gabarito (mm)								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
1	1340	1122	860	610	490	390	290	240	160
2	1410	1133	890	670	504	420	332	220	174
3	1470	1160	902	660	534	389	334	250	199
4	1530	1193	898	693	560	411	334	234	190
Média	1438	1152	888	658	522	403	323	236	181
	1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2
Medida de entreferro g(x) (mm)									

A FIG. 50 relaciona valores de voltagem obtidos no condicionador de sinais e a espessura de entreferro.

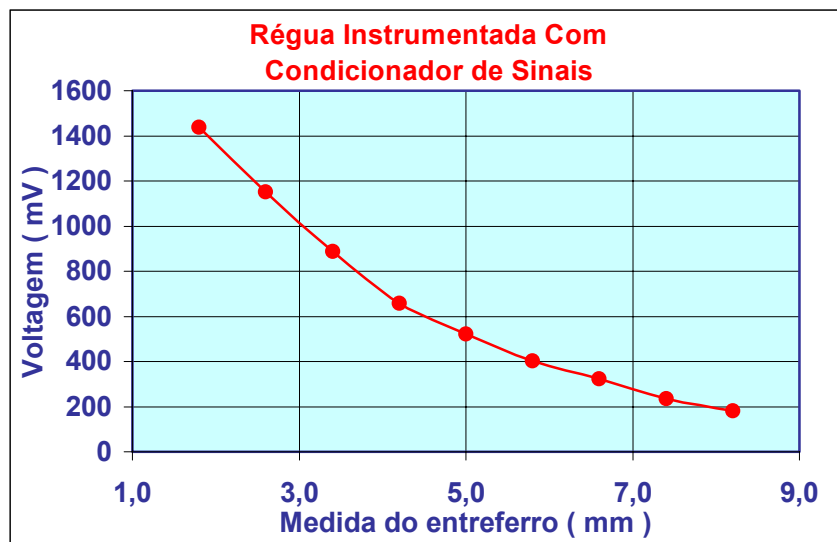


FIG. 50: Voltagem na régua instrumentada em função da espessura de entreferro.

4.2.3. Comportamento da Amostra

Pela análise dos dados obtidos até o momento é possível constatar:

- *Numa mesma posição, os valores de força magnética tendem a aumentar com o tempo.*

Numa mesma coluna da TABELA 4 observa-se um aumento de força magnética com decorrer do tempo. Os valores foram obtidos com um intervalo de tempo de aproximadamente 4 minutos. Isto pode indicar existência de um campo magnético suficientemen-

te intenso para alterar os domínios magnéticos no material. Valores pequenos de entreferro (1,8 mm a 3,6 mm) apresentam maiores variações por estarem sujeitos a campos mais intensos. Esta variação produz incerteza nas medidas, uma vez que não foi atingida a saturação magnética do material.

- *A relação entre força magnética e espessura de entreferro não é linear.*

A relação não linear contida na FIG. 50 dificulta as inspeções, tornando necessário definir intervalos de precisão. Pode-se minimizar o problema aumentando os valores de massa magnética, o que representa um aumento de ganho ao instrumento. Em contrapartida, aumenta-se a intensidade de corrente elétrica na bobina, tornando o transdutor inadequado às condições petroquímicas.

4.2.4. Transdutor Magnético 01

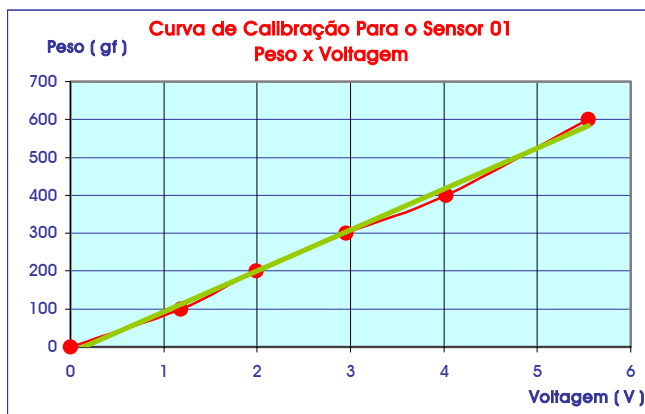
A calibração do *Transdutor Magnético 01* utilizou os mesmos procedimentos empregados para a régua instrumentada. Os dados obtidos encontram-se na TABELA 5.

Como previsto na Equação 44 existe linearidade entre voltagem/corrente elétrica e pesos aferidos.

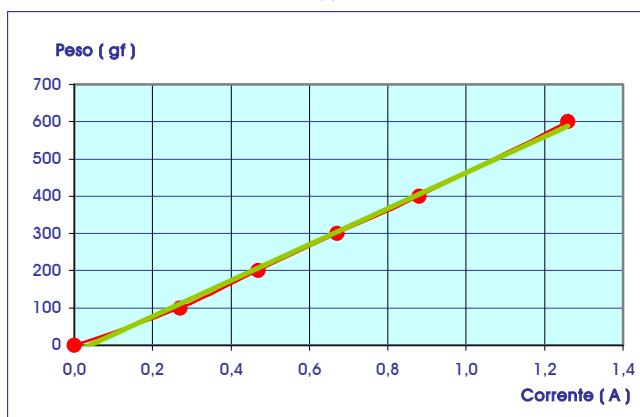
TABELA 5: Valores de voltagem e corrente x peso para o Transdutor Magnético 01

	Massa (g)	Peso (gf)	i (A)	ddp (V)
	0	0	0,00	0,00
1	100	100	0,27	1,18
2	200	200	0,47	1,99
3	300	300	0,67	2,95
4	400	400	0,88	4,02
5	600	600	1,26	5,55
Calibrações				
$F = 481.27a - 18.086$				
$F = 107.81v - 15.261$				

As funções de transferência para cada uma das curvas apresentadas em FIG. 51a e b, estão representadas abaixo:



(a)



(b)

FIG. 51: Gráficos (a) peso sobre o cone do alto falante e a voltagem necessária para retornar a posição inicial (b) pesos sobre o cone e a corrente necessária para retornar a posição inicial.

$$F = 107,81v - 15,261 \text{ (voltagem - mV)}$$

Equação 22

$$F = 481,27i - 18,086 \text{ (corrente - mA)}$$

Equação 23

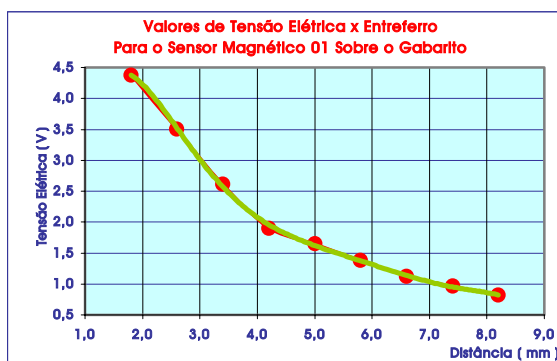
Na função transferência força x voltagem $F(v) = a.v + b$, o termo independente apresenta um valor relativamente alto (aproximadamente 15% da primeira medida), indicando sobrecarga de voltagem e corrente sobre a bobina. Apesar do alto-falante ser de grande potência, o efeito Joule é acentuado. Concluindo, torna-se inadequado utilizar este tipo de enrolamento até o valor limite de 500gf.

Analisando-se o gabarito em cunha com este transdutor pode-se construir a TABELA 6. Observa-se algumas variações anômalas entre as espessuras de entreferro 4,0 mm e 5,0 mm, sem causa justificada. Estas variações estão representadas na FIG. 52.. Repetindo-se o procedimento o efeito anômalo permanece, embora com pequeno deslocamento lateral. Pode-se observar novamente um aumento gradativo de tensão/corrente com o tempo de exposição ao campo magnético (várias colunas da TABELA 6), evidenciando histerese magnética.

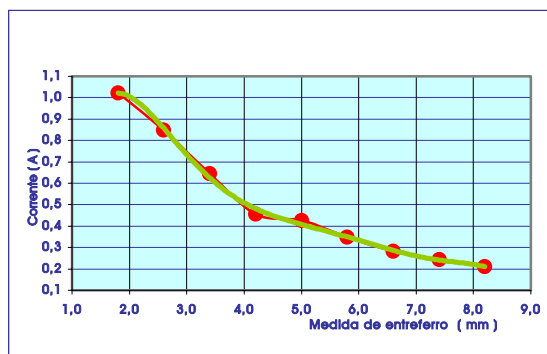
TABELA 6: Valores voltagem e corrente obtidos sobre o gabarito com o Transdutor Magnético 01

Voltagem (mV) e Corrente (A) x Medida de Entreferro (mm) para o Transdutor Magnético 01									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Corrente	1,003	0,836	0,632	0,473	0,411	0,362	0,286	0,228	0,223
	1,031	0,835	0,653	0,437	0,433	0,336	0,275	0,226	0,192
	1,033	0,875	0,650	0,456	0,431	0,347	0,284	0,281	0,215
	1,022	0,849	0,645	0,455	0,425	0,348	0,282	0,245	0,210
Tensão	4,234	3,430	2,571	1,916	1,541	1,446	1,173	0,905	0,879
	4,380	3,451	2,638	1,981	1,726	1,333	1,073	0,886	0,749
	4,520	3,628	2,634	1,807	1,692	1,357	1,110	1,093	0,833
	4,378	3,503	2,614	1,901	1,653	1,379	1,119	0,961	0,820
	1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2

Nos gráficos de corrente/voltagem em função da espessura de entreferro contidos na FIG. 52, as funções de transdução $V(g)$ e $I(g)$ não são lineares. Os polinômios¹¹ que melhor ajustam estas curvas estão apresentados nas Equação 24 e Equação 25.



(a)



(b)

FIG. 52: Gráfico de voltagem e corrente elétrica em função da espessura de entreferro para o Transdutor Magnético 01

$$V = -0,001g^6 + 0,0322g^5 - 0,4262g^4 + 2,863g^3 - 10,039g^2 + 16,14g - 4,9493 \quad \text{Equação 24}$$

$$A = -0,0003e^6 + 0,0113e^5 - 0,1481e^4 + 0,9909e^3 - 3,4936e^2 + 5,8468e - 2,6092 \quad \text{Equação 25}$$

¹¹ A interpolação polinomial se ajusta melhor à curva que a interpolação exponencial. Também é fácil verificar que termos significativos no polinômio ocorrem até a 3ª ordem.

4.2.5. Comparação entre Régua Instrumentada e Transdutor Magnético 01

De posse das funções de transferência $F(V)$ (Equação 22) do *Transdutor Magnético 01* e $F_R(V)$ (Equação 21) da *Régua Instrumentada* foi possível converter voltagem em peso e completar a TABELA 7 e a TABELA 8.

TABELA 7: Valores força em função da distância sobre o gabarito para 10 g de massa magnética no T.M.01.

		Transdutor Magnético 01								
Força (gf)	Distância sobre o gabarito (mm)									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
1	441	355	262	191	151	141	111	82	80	
2	457	357	269	198	171	128	100	80	65	
3	472	376	269	180	167	131	104	103	75	
Média	457	362	267	190	163	133	105	88	73	
	1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2	
		Medida de entreferro no gabarito (mm)								

TABELA 8: Valores força em função da distância sobre o gabarito para 26 g de massa magnética no T.M.01

		Régua Instrumentada								
Força (gf)	Distância sobre o gabarito (mm)									
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
1	441	370	285	203	164	132	99	83	56	
2	464	374	295	223	169	141	113	76	61	
3	484	383	298	220	178	131	113	86	69	
Média	463	376	293	215	170	135	108	81	62	
	1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2	
		Medida de entreferro no gabarito (mm)								

A TABELA 9 apresenta o erro percentual encontrado quando comparados os resultados de peso fornecidos pelo *Transdutor Magnético 01* e à régua instrumentada.

TABELA 9: Comparação entre força lida pela régua instrumentada e o Transdutor Magnético 01

Comparação entre Régua Instrumentada e Transdutor Magnético 01								
20	40	60	80	100	120	140	160	180
4,8%	5,8%	11,1%	11,8%	12,2%	4,3%	2,7%	1,0%	24,3%
Desvio em Porcentagem								

Do conjunto de informações colhido até o momento conclui-se:

- A concordância entre os métodos é boa, levando-se em consideração as condições experimentais. Com o auxílio da TABELA 9, verifica-se uma divergência de 8,7% em média.
- O erro é causado principalmente pelo surgimento de campo magnético remanescente no material. Erro por acomodação térmica do circuito foi descartado após repetição da experiência em meses diferentes, aguardando-se horas para o início da coleta de dados.
- Numa mesma posição, os valores de força magnética tendem a aumentar com o tempo. Trata-se de um efeito inerente ao material inspecionado, independente da espécie de transdutor.
- Campos magnéticos com orientação constante produzem histerese em materiais magneticamente “moles”.
- As funções de transferência $F(g)$ não são lineares.
- Os valores de voltagem e corrente quando intensos, desviam o transdutor da linearidade.
- O fator acoplamento à superfície é preponderante na precisão da medida.
- Durante a análise torna-se difícil precisar o momento exato do destaque da superfície, principalmente para valores grandes de entreferro.

Observação: No gabarito em cunha o fator acoplamento entre superfícies atingiu 30% de erro.

4.2.6. Análise do Transdutor Magnético 01

Analisando-se a viabilidade do *Transdutor Magnético 01* como transdutor transdutor magnético sensível, podem ser levantadas as seguintes objeções:

1. *Numa mesma posição, os valores de corrente e voltagem tendem a aumentar com o tempo.*

Mesmo mantendo o transdutor estático, observa-se um acréscimo na voltagem no decurso do tempo. Descarta-se a possibilidade de deriva térmica (ocorrem em ambos aparelhos). Trata-se de uma característica intrínseca ao aço ABNT1030.

Repetindo-se o procedimento sobre amostras HP40 verifica-se comportamento magnético similar ¹².

2. *A relação força magnética não é linear com a espessura do entreferro.*

Este fato isolado não inviabiliza o método. Muitos transdutores de amplo uso na indústria apresentam curvas de calibração não linear (termopares por exemplo), bastando definir faixa de precisão para o emprego do transdutor. Porém, em fase de projeto, seria conveniente simplificar a calibração.

3. *Os valores de força são intensos.*

Flutuações indesejáveis são observadas nos gráficos de voltagem/corrente x entreferro (FIG. 52). O principal motivo destas variações reside no alto índice de ruído. Caso a sensibilidade de um transdutor seja baixa, ruído e medição passam a ter a mesma magnitude, interferindo-se mutuamente. O aumento da intensidade da força magnética, diminuí *relativamente os ruídos*, como observado na FIG. 53, onde foram empregadas massas magnéticas de 29 g ao invés de 15g.

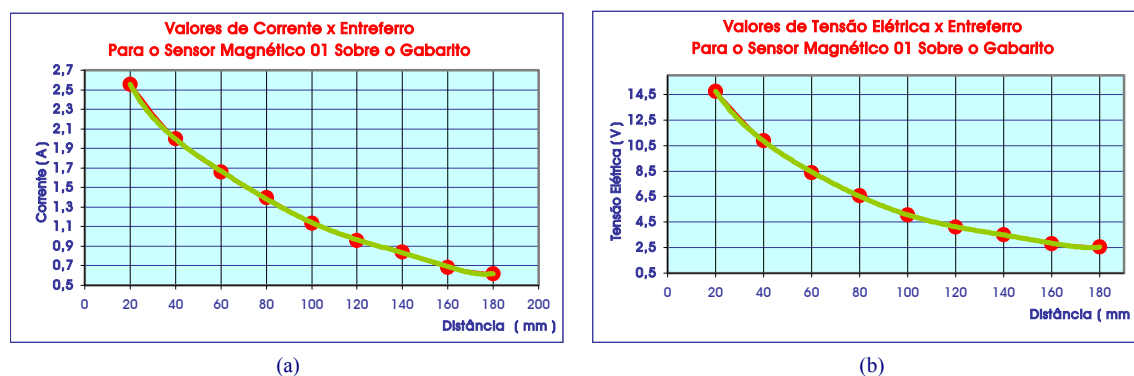


FIG. 53: Gráficos de voltagem e corrente em função da espessura de entreferro para o Transdutor Magnético 01 com o dobro de massa magnética.

¹² Como as principais fontes de incerteza são o acoplamento ímã-amostra e a histerese magnética, abandonou-se o estudo para viabilizar outra espécie de transdutor de força (pressostatos, strain gages em membranas metálicas, etc...).

4.3. Transdutor Magnético 02

Um campo magnético oscilante¹³, se devidamente escolhido, pode minimizar o efeito de histerese, efeito este detectado nas espécies analisadas. Campos magnéticos oscilantes de altas frequências tendem a ter pouca penetração na matéria e serem rapidamente anulados por correntes de Foucault.

O *Transdutor Magnético 02* foi criado a partir de uma fonte de alimentação comercial. Um estudo prévio das características de indução e impedância foi executado com a finalidade de caracterizar o indutor, descrito no Apêndice 8.3.2. Determinação do Número de Espiras do Indutor à página 113.

Para aumentar a sensibilidade do transdutor utilizou-se uma bobina como secundário de transformador de voltagem, levando-se em conta a relação do número de espiras no enrolamento primário e secundário (primário com poucas espiras).

A FIG. 54 apresenta a codificação utilizada no indutor do transdutor 02.

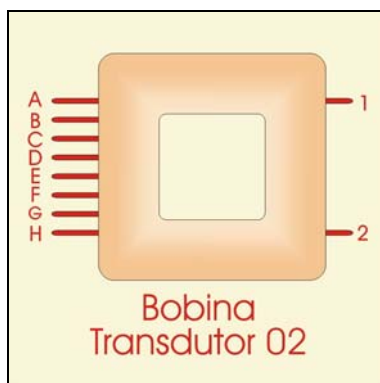


FIG. 54: Transformador com enrolamento primário segmentado de A a H e secundário 1-2.

Em um transformador normal, o maior fator multiplicativo entre as tensões primária e secundária, ocorre com a maior diferença no número de espiras entre enrolamentos. Porém, como a armação ferro-silício encontra-se aberta, o melhor fator ocorreu unindo as bobinas de A-G no enrolamento primário e 1-2 no secundário. Nestas condições o fator variou entre 7 a 25 vezes, dependendo da frequência.

Com os três entreferros voltados para a superfície do gabarito, registrou-se os valores médios de voltagem e corrente em função da distância sobre o gabarito. (TABELA 29 e TABELA 30 do Apêndice 8.3.3. Valores de Voltagem e Corrente para o T.M. 02 sobre o

¹³ Os domínios magnéticos podem ser perturbados pela incidência de campos magnéticos intensos. A utilização de campo oscilante não visa eliminar a histerese, mas confina-la em duas direções. Um estudo aprofundado do assunto melhoraria a performance dos transdutores.

Gabarito na página 116) . Com estes valores foram elaborados os gráficos de voltagem x distância e corrente x distância da FIG. 55 e FIG. 56, respectivamente.

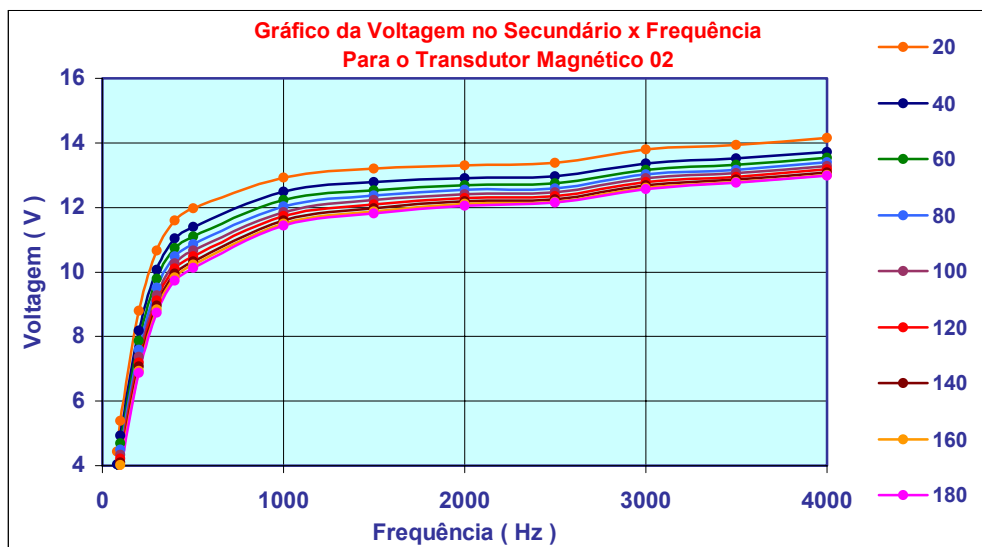


FIG. 55: Gráfico de voltagem versus frequência utilizada pelo T.M. 02 sobre o gabarito

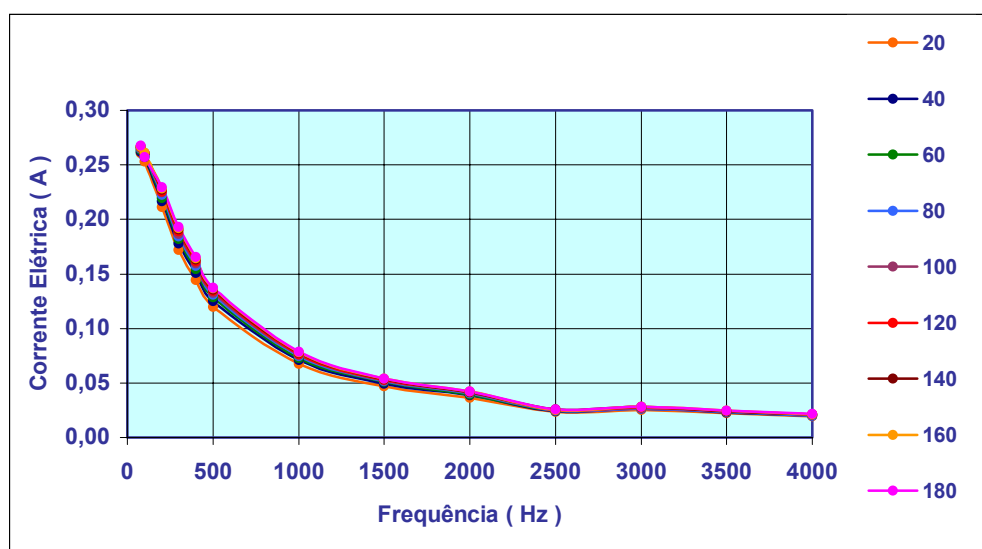


FIG. 56: Gráfico de corrente versus frequência utilizada pelo T.M. 02 sobre o gabarito

O melhor desempenho do transdutor (sensibilidade) é obtido comparando-se as medidas a 20 mm e 180 mm sobre o gabarito (para o este transdutor, corresponde à faixa entre 200 Hz e 500 Hz. Porém, analisando o gráfico de voltagem (ou corrente) em função da frequência, a sensibilidade permanece inalterada a partir de 2 kHz (FIG. 55). Este fato parece bastante coerente com a teoria uma vez que $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$.

Aumentando-se o valor de ω (frequência), aumenta-se a impedância do sistema, causando drástica diminuição da corrente elétrica.

Caso se tenha um bom controle da frequência de excitação, a melhor faixa de operação encontra-se entre 800 Hz e 1000 Hz, por apresentar mais estável e com maior sensibilidade¹⁴.

Os gráficos da FIG. 55 e FIG. 56 apresentam uma irregularidade na curva em torno de 2,5 kHz. Algum tipo de interação eletromagnética perturba o sistema nesta frequência.

Todas as medidas foram repetidas quatro vezes entre as frequências de 100 Hz à 1kHz. Nesta operação observou-se uma estreita dependência entre desvio das medidas e acoplamento/posição do transdutor sobre o gabarito. Isto ocorre devido à rápida variação do campo magnético com a distância e a dependência da indutância com a área do material exposta às linhas de campo magnético.

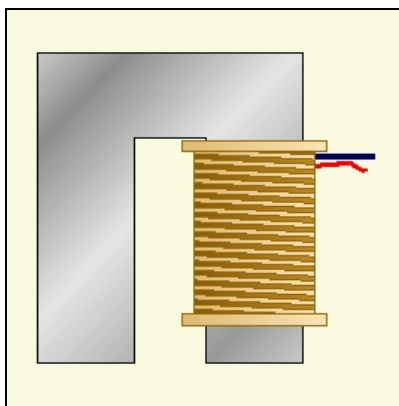
O mesmo referencial transdutor/superfície foi empregado em todas as medições (centro da área transversal alinhada com a referência traçada a cada 10 mm sobre o gabarito), obtendo-se erro inferior a 0,1%.

Para garantir homogeneidade nos dados, duas medidas (das quatro executadas) foram executadas no sentido ascendente e duas no sentido descendente na cunha metálica do gabarito. Entre cada um dos pares, inverteu-se a ordem dos entreferros. Em todos os casos, o valor registrado foi praticamente o mesmo, indicando característica de isotropismo.

4.4. Transdutor Magnético 03

Uma melhoria na definição do campo magnético produz maior acuidade e sensibilidade ao transdutor. Por este motivo eliminou-se um dos entreferros do núcleo metálico.

Entrando em contato com fabricantes de transformadores e bobinados construiu-se o núcleo em U, como mostrado na FIG. 57.



¹⁴ Uma outra razão apontada para esta escolha é o afastamento das frequências próximas a 60 Hz, fator poluente de circuitos eletrônicos por ser a frequência usualmente empregada da rede de distribuição doméstica.

FIG. 57: Transdutor Magnético 03 com dois entreferros

Semelhante ao *Transdutor Magnético 02*, o acoplamento entre bobinas apresentou um melhor acoplamento com as bobinas A-B, B-C, C-D, D-E e E-F ligadas em série no primário. A razão é bastante clara. Além do fator multiplicativo, temos de levar em conta o fator acoplamento de indutâncias, uma vez que o núcleo de ferro silício não se encontra fechado¹⁵.

Voltando a utilizar *Transdutor Magnético 02* sobre o gabarito em cunha, seguindo os mesmos procedimentos, encontraram-se os dados de voltagem x distância e corrente x distância (TABELA 31 e TABELA 32 do Apêndice 8.3.4. Valores de Voltagem e Corrente para o T.M. 03 sobre o Gabarito da pág. 117). Os gráficos correspondentes encontram-se nas FIG. 58 e FIG. 59.

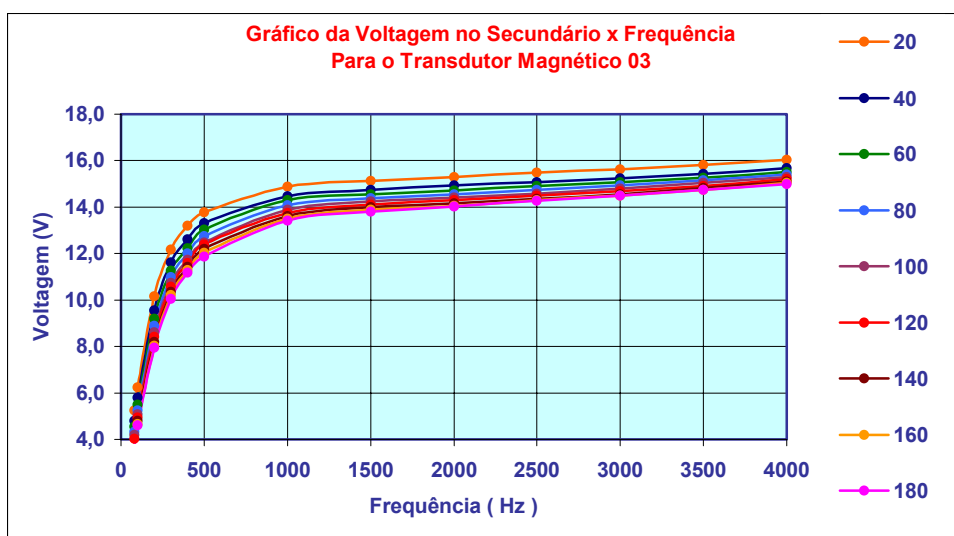


FIG. 58: Gráfico de voltagem em função da frequência para o Transdutor Magnético 03.

As respostas encontradas são muito semelhantes às encontradas no transdutor anterior porém com maior acuidade. Comparando-se os gráficos da FIG. 56 e FIG. 59, observa-se o desaparecimento da perturbação próxima a 2500 Hz. Isto revela que a restrição ao número de entreferros restringe o caminho das linhas de indução magnética pelo interior do núcleo metálico. Outras influências (interferência de frequências externas, ressonâncias, etc...), devem receber tratamento diferenciado.

¹⁵ A escolha do valor 0,566 V como voltagem de excitação deve-se exclusivamente à potência da fonte utilizada.

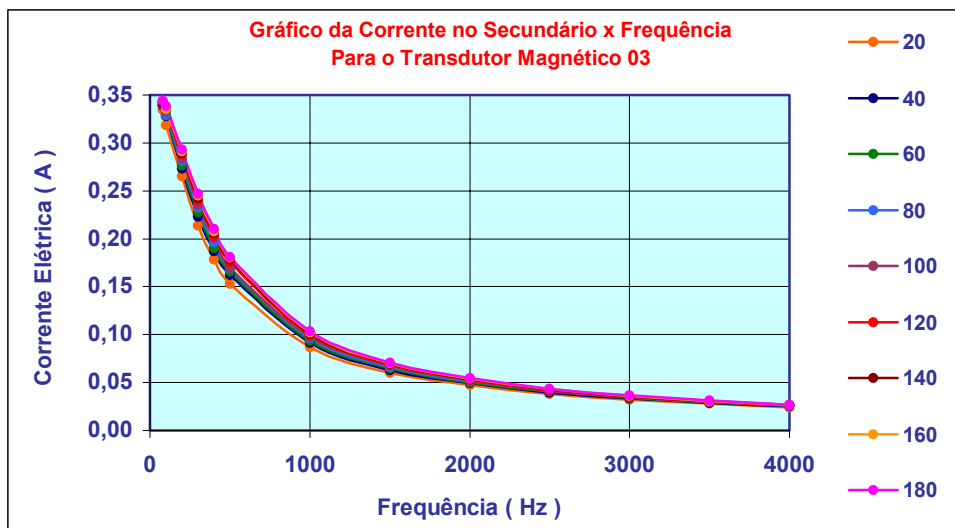


FIG. 59: Gráfico de corrente em função da frequência para o Transdutor Magnético 03.

4.4.1. Análise da Linearidade Entre Corrente Elétrica no Primário e Espessura de Entreferro

A busca da linearidade corrente elétrica e espessura de entreferro é prevista pela Equação 15, $i_M = k.g(x)$, deduzida no item 2.6. (Primeira Proposta Para Investigar a Relação entre Intensidade de Corrente (I) e Espessura de Entreferro (g(x))) na pág.25

A dedução desta equação não leva em conta a interação entre primário e secundário. Desta forma, retornando ao *Transdutor Magnético 03*, desprezou-se o circuito secundário, aumentando-se a voltagem no primário (A-B, A-C, A-D, A-E, A-F e A-G em série), criando-se o *Transdutor Magnético 03 Modificado*. A partir dos dados colhidos apenas com as bobinas do primário construiu-se a TABELA 33 do Apêndice 8.3.5. Valores de Corrente para o T.M. 03 Modificado da pág. 118. Os gráficos correspondentes em 500 Hz e 700 Hz encontram-se na FIG. 60 e FIG. 61.

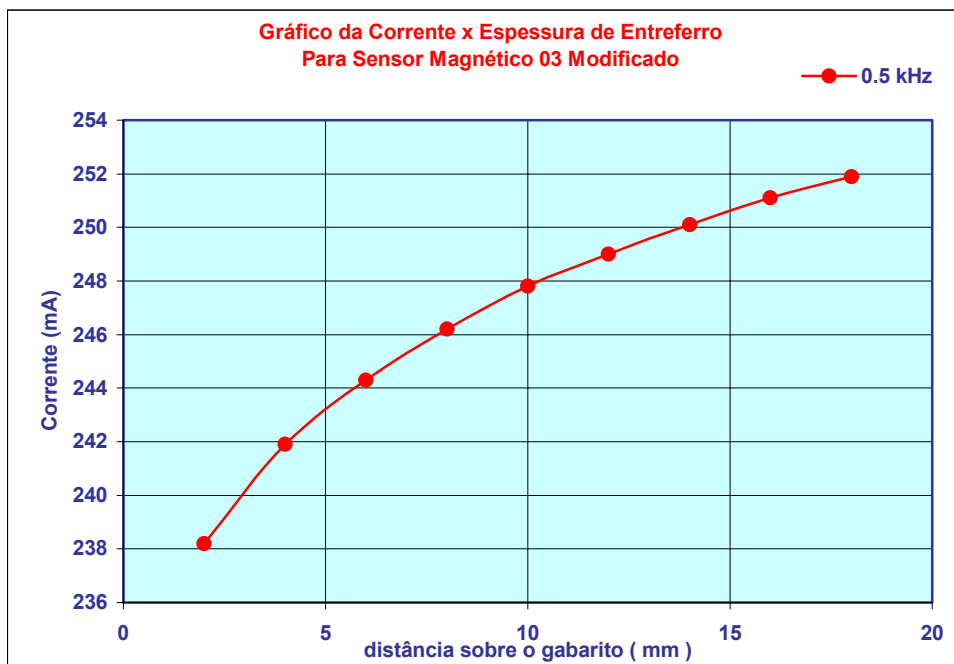


FIG. 60: Gráfico do Transdutor Magnético 03 Modificado para a frequência de 500 Hz

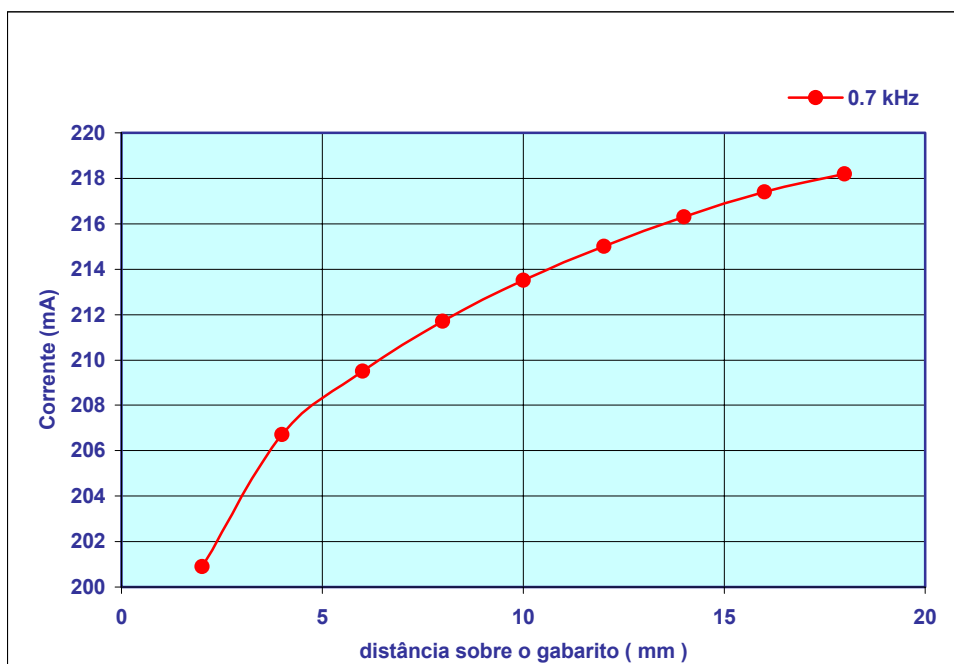


FIG. 61: Gráfico do Transdutor Magnético 03 Modificado para a frequência de 700 Hz.

Ao analisar os gráficos de corrente versus espessura descarta-se completamente a possibilidade de uma relação linear entre as grandezas. Pela Equação 15 é possível verificar que nem todas as condições de contorno foram cumpridas: a área do fluxo magnético A_g não permaneceu constante.

Ao que tudo indica, o transdutor apresenta grande distorção de campo nas proximidades dos entreferrros. Dois fatos concorrem para esta afirmação:

- O Transdutor Magnético 03 Modificado é anisotrópico enquanto o Transdutor Magnético 02 não: numa mesma posição sobre o gabarito, é possível inverter as posições dos entreferros no *Transdutor Magnético 02* sem que haja alteração da medida. Porém, quando executada com o *Transdutor Magnético 03*, ocorre variação em torno de 10%. A falta de simetria ocasiona um fluxo magnético diferente em cada entreferro.
- A indutância do Transdutor Magnético 03 depende da posição da bobina no núcleo de ferro silício: ao deslocarmos levemente a bobina no núcleo, o *Transdutor Magnético 03 Modificado* sofre variação acentuada de indutância. Isto significa que o fluxo magnético não está concentrado no núcleo de ferro-silício, mas em torno da bobina.

A faixa de frequência de maior sensibilidade mudou para região entre 1 kHz e 2kHz. A análise completa desta alteração encontra-se no Apêndice 8.3.6. Alteração da Faixa de Frequência de Maior Sensibilidade da pág. 118.

4.4.2. Inspeção de Tubo HP40

Um tubo classe HP40 com aproximadamente 37.000 horas em serviço foi submetido à inspeção com o *Transdutor Magnético 03*. Uma primeira inspeção foi realizada grosseiramente com ímãs permanentes para localizar as regiões mais cementadas.

Construiu-se um cavalete de apoio ao *Transdutor Magnético 03* evitando desconectar o circuito elétrico. Dotado de rolamentos de apoio, o tubo pôde girar livremente, dando possibilidade ao transdutor atingir qualquer ponto da superfície. Após mapeamento do tubo, como indicado na FIG. 62, os dados foram lançados na Valores de Voltagem do Transdutor 03 no Tubo HP40

TABELA 26, contida no Apêndice 8.3.1. Valores de Voltagem do Transdutor 03 no Tubo HP40 à pág.112.

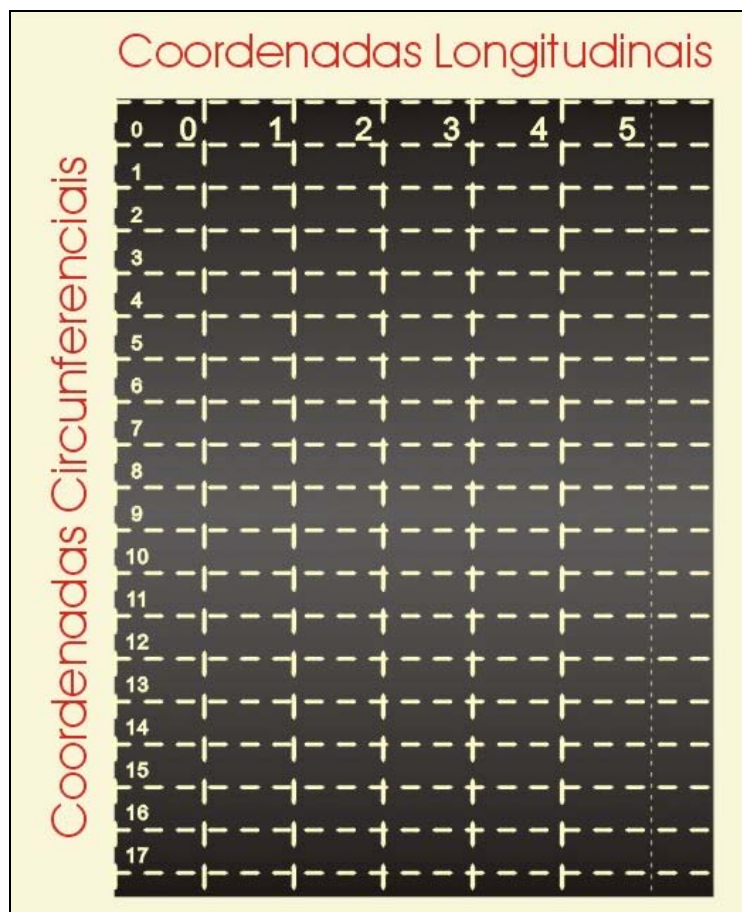


FIG. 62: Referências sobre a superfície do tubo

A sensibilidade do transdutor pode ser controlada pela voltagem de excitação. Durante a inspeção, praticamente não foi encontrada flutuação no zero da escala.

Em termos de repetibilidade, o *Transdutor Magnético 03* mostrou-se estável, não ocorrendo variação nas medidas em três épocas diferentes do ano.

A inspeção realizou-se posicionando o centro da área transversal de cada entreferro sobre linha circunferencial marcada sobre o tubo (quando utilizado o sentido paralelo para o transdutor) ou a linha longitudinal (quando utilizado o sentido transversal).

Os valores médios de voltagem da Valores de Voltagem do Transdutor 03 no Tubo HP40

TABELA 26 encontram-se resumidos na TABELA 10. Estes dados foram colhidos com o transdutor mantendo o sentido “paralelo” como ilustrado na FIG. 63a. Todas as medidas utilizaram o suporte com rolamento, descrito anteriormente na FIG. 34.

TABELA 10: Voltagem do Transdutor Magnético 03 sobre tubo HP40 no sentido transversal.

		Transdutor Magnético 03 - Voltagem (V)				
		Posição Longitudinal				
Posição Circunferencial		1	2	3	4	5
	0	12,176	12,187	12,152	12,129	12,115
	1	12,302	12,297	12,281	12,260	12,219
	2	12,468	12,443	12,469	12,441	12,321
	3	12,425	12,490	12,448	12,420	12,429
	4	12,334	12,342	12,368	12,345	12,332
	5	12,179	12,162	12,090	12,056	12,081
	6	12,069	12,027	11,927	11,907	11,977
	7	11,991	11,949	11,928	11,919	11,988
	8	11,986	11,983	11,937	11,904	12,007
	9	12,105	12,101	11,988	11,949	11,984
	10	12,306	12,226	12,088	12,051	12,084
	11	12,554	12,530	12,234	12,164	12,216
	12	12,559	12,499	12,348	12,299	12,295
	13	12,524	12,454	12,422	12,371	12,421
	14	12,293	12,347	12,310	12,257	12,301
	15	12,195	12,214	12,216	12,180	12,158
	16	12,170	12,157	12,135	12,111	12,113
17	12,187	12,149	12,095	12,095	12,091	



(a)



(b)

FIG. 63: Transdutor Magnético 03 no (a) Sentido Paralelo e (b) Sentido Transversal.

Cada posição longitudinal da FIG. 64 deve ter associação à FIG. 65 que representa o perfil de cementação no perímetro do tubo. Cada posição longitudinal representa uma seção transversal do tubo. Posteriormente o tubo foi seccionado nestas posições e submetido à análise por partícula magnética e ataque químico.

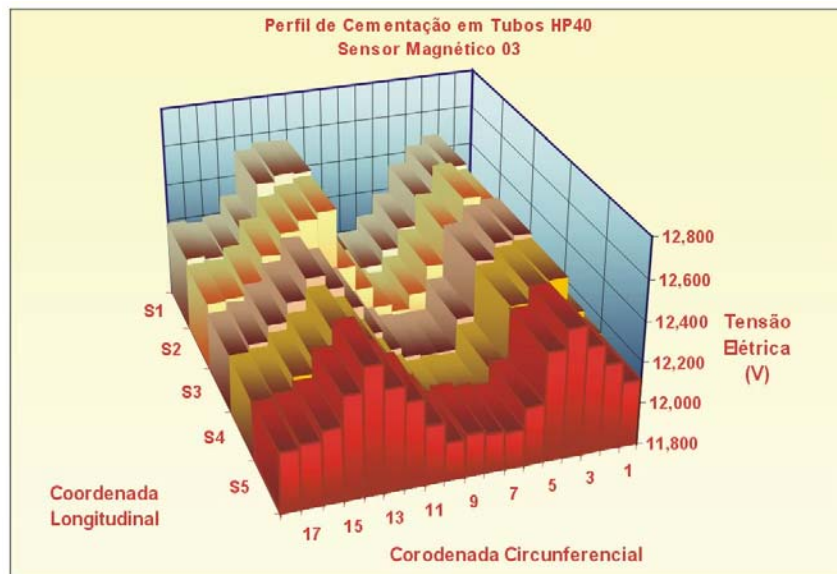


FIG. 64: Gráfico em barras dos valores de voltagem lidos pelo Transdutor Magnético 03 em função das posições longitudinais e circunferenciais no tubo cementado em campo

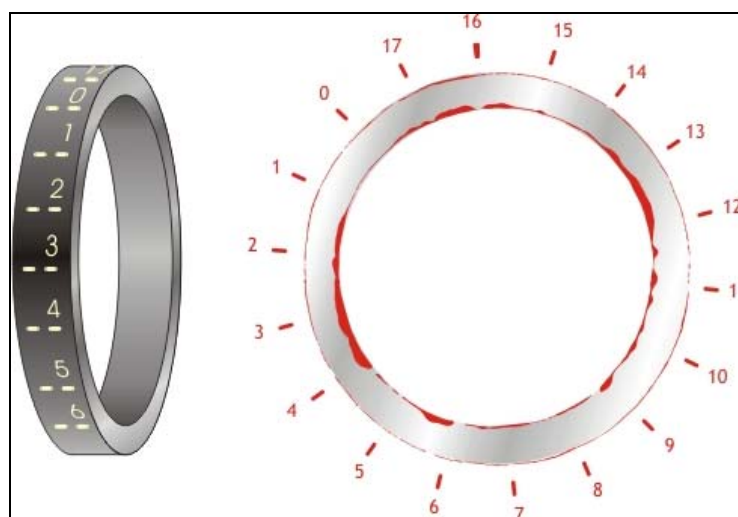


FIG. 65: Perfil de cementação de uma seção transversal de tubo classe HP40

Os dados do gráfico contido na FIG. 64, demonstram existir sensibilidade suficiente para captar variações magnéticas na matriz.

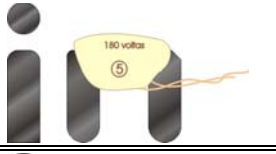
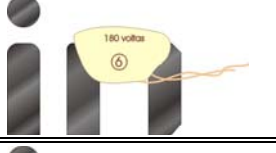
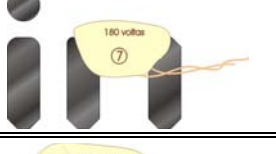

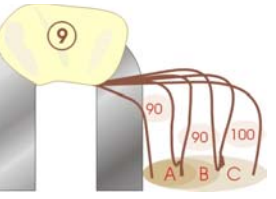
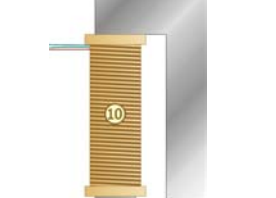
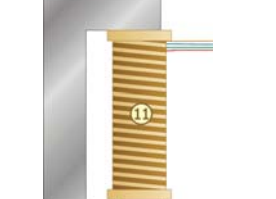
Quando em serviço, o tubo apresenta aquecimento heterogêneo, originando cementação mais intensa nas posições 03 e 13 e mínima entre as posições 05 e 07.

4.5. Estudo do Campo Magnético Através da Geometria dos Transdutores

Esta análise passa pela construção de novos transdutores, verificando-se o ganho, a sensibilidade e facilidade de acoplamento com a superfície da amostra. Para cada transdutor adotou-se como padrão de referência a mesma leitura de corrente na posição 180 mm

sobre o gabarito (147,0 mA). A sensibilidade foi calculada em valor percentual e apresentadas na TABELA 11. Detalhes dos cálculos da sensibilidade dos Transdutores Magnéticos de 04 a 11 são apresentados no Apêndice 8.2. Estudo do Campo Magnético da pág. 106.

TABELA 11: Resumo de todos os transdutores e suas respectivas sensibilidades

		400		1000		2000			
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)		
		Transdutores Sensibilidade %		4	18	2	16		1
5	11			0	9	0	8	0	
6	9			8	9	6	7	5	
7	6			7	6	5	5	4	
8	21			1	17	0	13	0	
9A	13			6	15	2	11	2	
9B	23			1	19	1	14	1	
9C	26			1	22	0	18	0	
10	8			17	9	14	7	11	
11	28			0	25	0	22	0	

4.5.1. Análise dos Transdutores 04 a 11

Analisando os dados da TABELA 11, torna-se clara a dependência da sensibilidade e a área de entreferro. Quanto maior a área, maior o fluxo magnético. O aumento do número de espiras também exerce forte influência, porém com o grave inconveniente de aumentar a voltagem do circuito.

O posicionamento da bobina próximo a um dos entreferros aumenta a sensibilidade do instrumento apesar de aumentar o fluxo magnético disperso¹⁶.

Núcleos de ferrite apresentaram bom desempenho em termos de sensibilidade, contradizendo suposições iniciais. Porém, para a construção de transdutores dá-se preferência às placas de ferro-silício devido à sua resistência mecânica.

4.6. Transdutor Magnético 12 (Transdutor Magnético 07 com Fina Camada Metálica)

Na FIG. 66, tem-se uma lâmina de ferro-silício entre os entreferros do transdutor.. Pelos dados da TABELA 12 e a curva da FIG. 67 verifica-se que a sensibilidade do *Transdutor Magnético 12* mantém-se inalterada (a menos de um fator de escala) com a aplicação da folha metálica .

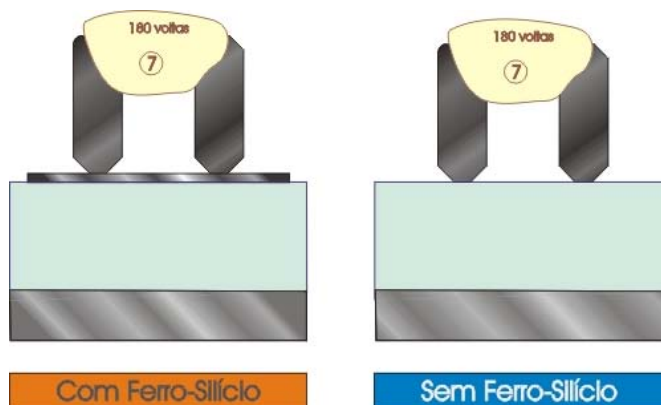


FIG. 66: Inspeção com o Transdutor Magnético12 tendo uma lâmina metálica nos entreferros

¹⁶ A principal razão de haver fluxo disperso está na relação existente entre área $A_{g(x)}$ do entreferro e a área A_S restante do transdutor. Quanto maior a espessura de entreferro, maior a relutância do sistema. A passagem do fluxo magnético pela região torna-se mais difícil (toda a superfície apresenta relutância equivalente), predominando a passagem de fluxo à geometria que apresente áreas próximas.

TABELA 12: Voltagem e corrente no Transdutor Magnético 12 sobre placa de ferro silício nos entreferros.

		400		800	
		A	V	A	V
Transdutor 07 - A	Distâncias (cm)				
	2	0,439	5,287	0,442	10,363
	4	0,452	5,287	0,454	10,363
	6	0,462	5,287	0,464	10,363
	8	0,471	5,287	0,472	10,363
	10	0,479	5,287	0,479	10,363
	12	0,486	5,287	0,486	10,363
	14	0,491	5,287	0,490	10,363
	16	0,496	5,287	0,496	10,363
	18	0,500	5,287	0,500	10,363
Transdutor 07 - B	Distâncias (cm)				
	2	0,429	9,946	0,433	19,113
	4	0,442	9,946	0,445	19,113
	6	0,455	9,946	0,458	19,113
	8	0,466	9,946	0,467	19,113
	10	0,475	9,946	0,476	19,113
	12	0,482	9,946	0,483	19,113
	14	0,489	9,946	0,489	19,113
	16	0,495	9,946	0,495	19,113
	18	0,500	9,946	0,500	19,113

A - Sem Placa de Ferro-silício nos Pólos
B - Com Placa de Ferro-silício nos Pólos

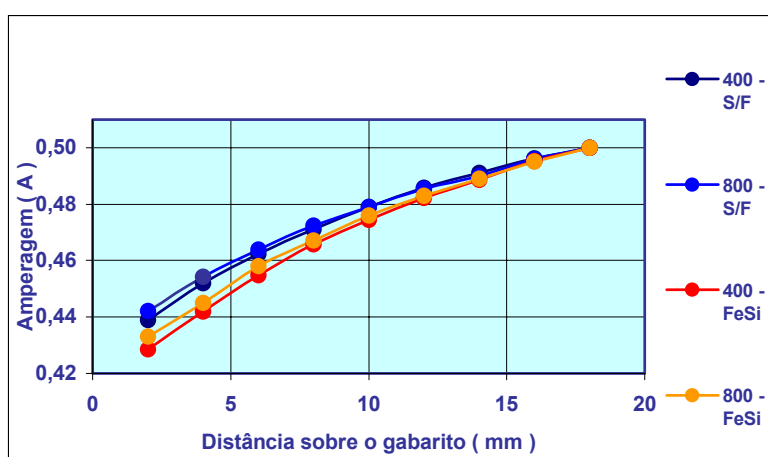


FIG. 67: Gráfico de corrente obtida com e sem lâmina de ferro-silício no T. M. 12

O parâmetro utilizado para comparar as condições experimentais com e sem a placa metálica entre os entreferrós do transdutor foi o valor inicial de corrente 0,500 mA na posição 180 mm sobre o gabarito, mantendo constante a voltagem.

A escolha do *Transdutor Magnético 07* para confeccionar o *Transdutor Magnético 12* deve-se à sua pouca sensibilidade comparada com os demais transdutores. Este ensaio simula as condições reais onde finas camadas de óxidos (provavelmente uma mistura de óxidos de silício) externas ao tubo, apresentam atividade ferromagnéticas. A atmosfera no interior apresenta características oxidantes, aumentando gradativamente a espessura da película. Desta forma, a aferição do “zero” de fundo de escala deve ser dinâmica, atualizada mesmo que se trate do mesmo tubo, em mesmas posições de análise.

Como apresentado na FIG. 67, pequenas camadas ferromagnéticas são permeáveis ao campo magnético gerado por este tipo de transdutor. Desta forma, é possível inspecionar condições magnéticas abaixo destas camadas.

4.7. Transdutor Magnético 13

Todas as inspeções até o momento ocorreram em laboratório, servindo-se de toda a instrumentação necessária. Porém a viabilidade destes transdutores depende da facilidade de operação e de sua portabilidade. Desta forma, construiu-se o *Transdutor Magnético 13*, unindo características dos transdutores anteriores e a praticidade dos condicionadores de sinais.

No esquema à FIG. 68 encontra-se ilustrado o circuito elétrico do *Transdutor Magnético 13*. Duas bobinas formam uma ponte de Wheatstone com dois resistores idênticos. Os valores de resistência ôhmica das bobinas e resistores são baixos, permitindo ao efeito indutivo predominar. A bobina L_x , analisadora, é aproximada da amostra enquanto a bobina L , de referência, é mantida afastada o suficiente da inspeção para não sofrer alteração de indutância.

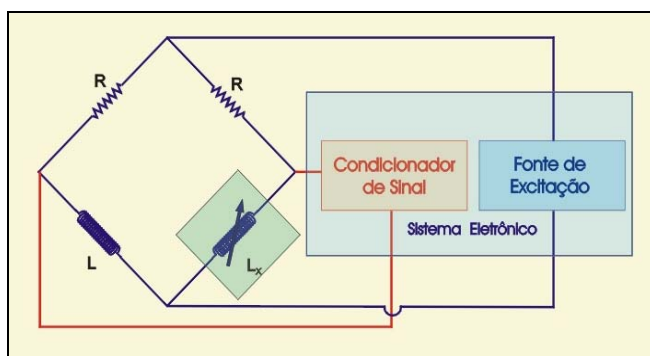


FIG. 68: Transdutor Magnético 13: ponte de Wheatstone e condicionador de sinais

Para homogeneizar o contato com a superfície, foram fixados calços de EVA (acetato de vinil etileno) nos extremos do núcleo magnéticos dos transdutores, permitindo um maior acoplamento à superfície inspecionada. Moldes diferentes foram criados em cada bobina (FIG. 69) de forma a permutarem suas funções (analisadora/referência) caso a análise exija medidas longitudinais ou circunferenciais no tubo.

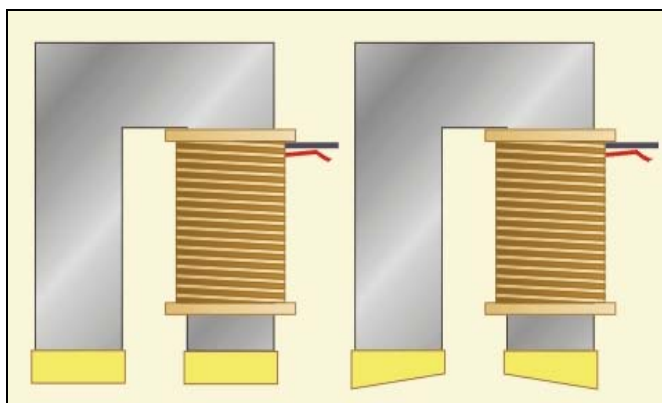


FIG. 69: Transdutor Magnético 13 com calços de EVA

Este transdutor apresenta anisotropismo, necessitando uma convenção de posicionamento conforme os sentidos mostrados na FIG. 70.



FIG. 70: Transdutor Magnético 13 sobre o gabarito no sentido 1 e 2

Estes sentidos querem significar unicamente a inversão dos entreferros na mesma posição sobre a superfície

Com a introdução de uma nova geometria conseguida pelos calços sob o núcleo do transdutor é possível verificar a homogeneidade magnética da cunha metálica. A FIG. 71 mostra o *Transdutor Magnético 13* em contato direto com a superfície metálica do gabarito.

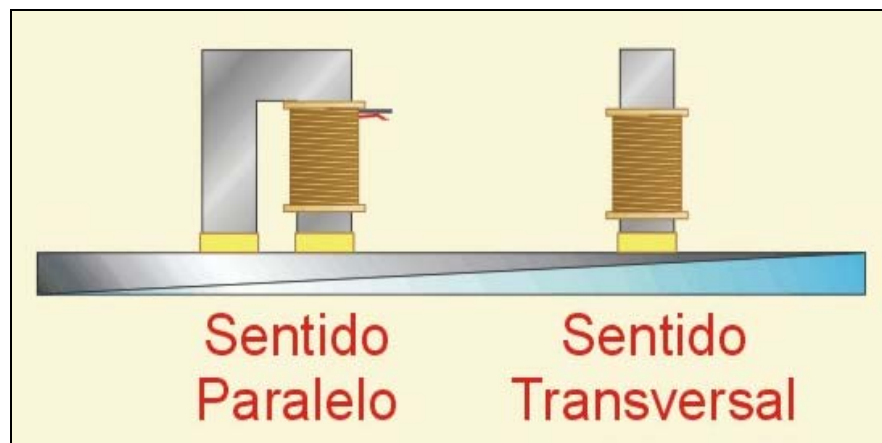


FIG. 71: Transdutor Magnético 13 sobre o gabarito no sentido paralelo e transversal.

A nomenclatura adotada para o preenchimento da TABELA 13 é a mesma adotada anteriormente. Os valores contidos nas linhas de 1 a 4 dessa Tabela, referem-se à inspeção sobre a face acrílica do gabarito, enquanto as linhas 6 e 7, 9 e 10 são referentes à superfície metálica. Pode-se verificar que mesmo após um aquecimento a 400°C, existe orientação magnética remanescente, ainda que de pequena magnitude.

TABELA 13: Transdutor Magnético 13 sobre o gabarito em cunha

		Transdutor Magnético 13 Sobre o Gabarito em Cunha										
		Distância sobre o gabarito (mm)										
Tensão em mV		20	40	60	80	100	120	140	160	180		
Face Acrílica	1	923	820	737	669	604	522	453	379	320	Sentido 01	
	2	944	824	752	689	604	530	458	375	322		
	3	960	852	770	697	617	545	478	399	341	Sentido 02	
	4	978	852	776	702	626	546	469	398	338		
	Média	951	837	759	689	613	536	465	388	330		
Face Metálica	1	1790	1827	1853	1876	1874	1870	1847	1865	1826	Sentido Paralelo	
	2	1791	1827	1851	1860	1884	1870	1846	1839	1812		
	Média	1791	1827	1852	1868	1879	1870	1847	1852	1819		
	1	1853	1793	1792	1800	1804	1823	1816	1820	1746	Sentido Transversal	
2	1862	1801	1799	1801	1802	1833	1820	1830	1742			
Média	1858	1797	1796	1801	1803	1828	1818	1825	1744			
		1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2		
		Medida de entreferro no gabarito (mm)										

É importante salientar que o transdutor magnético *mede espessura de entreferro e não quantidade de material ferromagnético*. Caso o transdutor fosse sensível ao volume de material magnético, ao longo do trajeto sobre o gabarito em cunha, teria-se variação entre a posição 20 mm de espessura ferromagnética pequena para a posição 18 mm. Os dados obtidos na “Superfície Metálica Paralela e Transversal” mostram não haver variação signifi-

cativa de voltagem ao longo da cunha metálica, significando que a leitura predominante é do afastamento entre transdutor e amostra (entreferro de EVA). Também mostram que a função de transdução $V(g)$ é linear ao longo do gabarito.

Parece haver uma contradição entre os dados colhidos nesta análise e a apresentada pelo *Transdutor Magnético 12* em películas finas. No primeiro caso, os valores de voltagem permanecem constantes mesmo quando a quantidade de material magnético varia sob o transdutor. No segundo caso, ocorre variação de voltagem com a variação de material magnético mesmo com uma fina camada ferromagnética se interpondo entre o transdutor e a amostra. Este fenômeno pode ser explicado pela intensidade do campo magnético. Conectando-se uma fina película metálica ao transdutor, ocorre uma diminuição de indutância do sistema e da corrente elétrica. O fluxo magnético confinado na película é pequeno, permitindo que pequeno aumento de corrente elétrica recupere o campo magnético que interage com a amostra em regiões distante da película. Porém, se for muito espessa (aproximadamente 2 mm), a maior parte do campo magnético fluirá por ela, tornando impossível a recuperação do campo com os valores de corrente utilizados. Nestas circunstâncias, deve-se pesquisar amostras localizadas somente entre a membrana e o núcleo do transdutor.

A FIG. 72 apresenta a curva de transferência $V(g)$. As barras de erro foram obtidas a partir do desvio padrão das medidas de 1 a 4, contidas da TABELA 13.

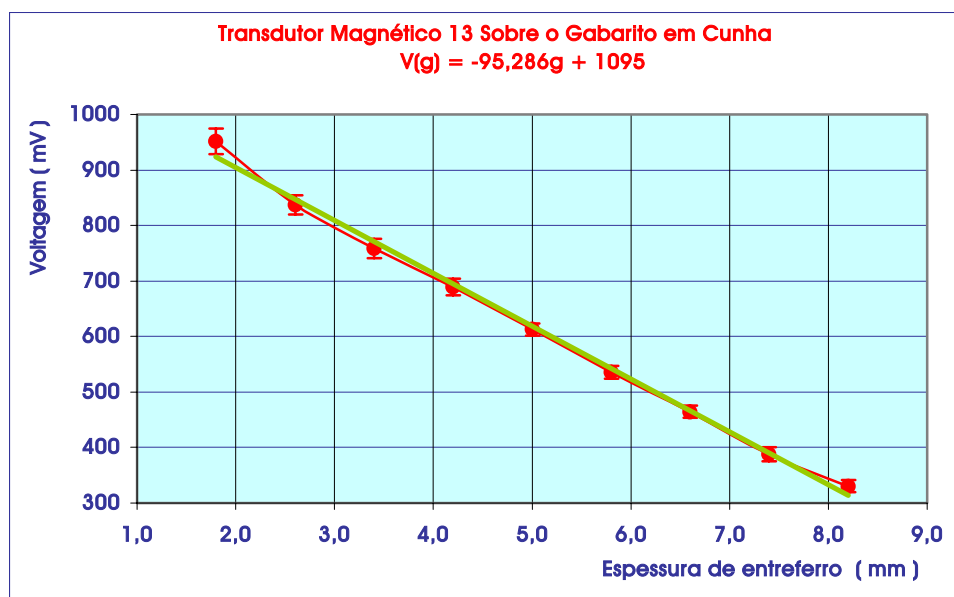


FIG. 72: Gráfico de voltagem versus espessura de entreferro para o T.M. 13

A TABELA 35 e TABELA 36, presentes no Apêndice 8.3.7. Valores de Voltagem Baixa e Alta Sensibilidade à pág.120, compara as análise em baixa e alta sensibilidade no condicionador de sinais do *Transdutor Magnético 13*. Esta operação analisa o grau de dis-

torção sofrido no sistema durante a amplificação do sinal (seja no sinal de excitação ou de saída já amplificado).

A FIG. 73 apresenta os gráficos em barras dos sinais, regulado para baixo e alto ganho de amplificação. Consta-se uma mesma resposta em ambas situações, não sofrendo distorção significativa.

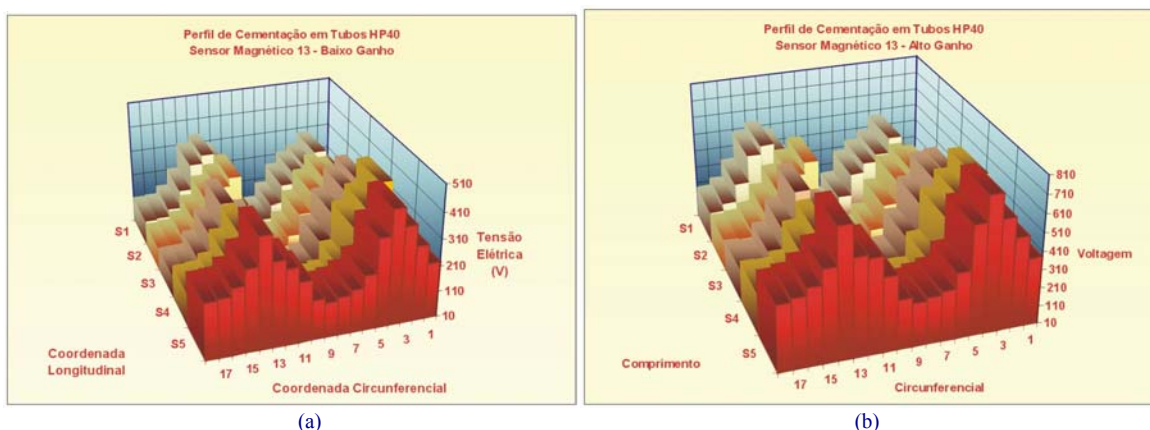


FIG. 73: Gráfico de barras correspondente a (a) baixa e (b) alta sensibilidade no condicionador de sinais do Transdutor Magnético 13

De forma semelhante ao *Transdutor Magnético 03*, o nível de cementação apresentado pelo gráfico é variado ao longo do tubo. A atmosfera do forno aquece o tubo de forma heterogênea, ocasionando cementação mais intensa em regiões específicas.

Comparando-se os gráficos da FIG. 74, obtida com o *Transdutor Magnético 03* (a) e o *Transdutor Magnético 13* (b), observa-se boa concordância nas coordenadas circunferenciais, atribuindo-se pequenos desvios a falhas de manipulação do transdutor no momento da inspeção (acoplamento entre as superfícies).

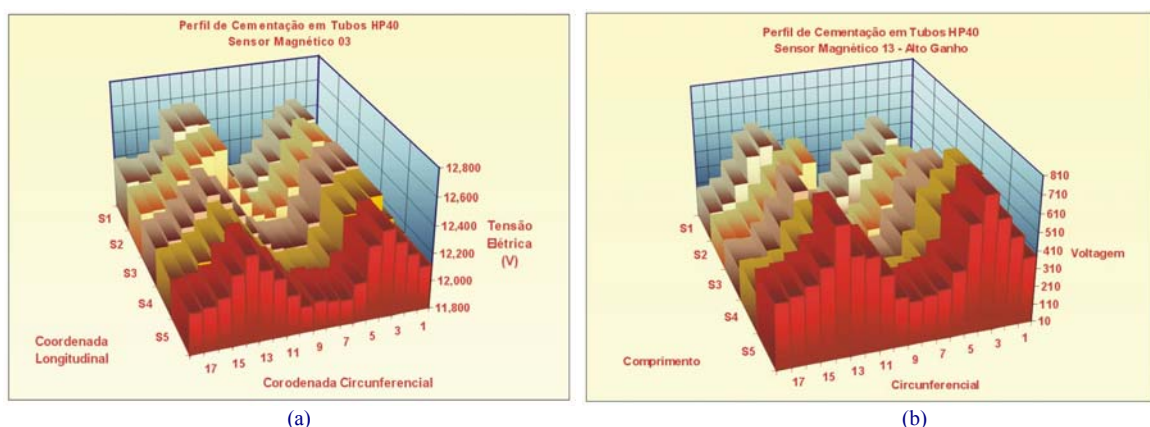


FIG. 74: Gráfico em barras da cementação ocorrida em tubo de 37.000 horas de trabalho lida pelos (a) Transdutor Magnético 03 e (b) Transdutor Magnético 13

As coordenadas longitudinais S₁ a S₂ porém, apresentam intensidades muito maiores no *Transdutor Magnético 03*. Fato inverso ocorre nas coordenadas S₄ e S₅, significando discordância em relação à intensidade magnética. Este fato possivelmente está relacionado

com a intensidade do campo magnético, uma vez que as intensidades de correntes medidas no *Transdutor Magnético 13* não ultrapassam 90 mA enquanto no *Transdutor Magnético 03* podem chegar a 700 mA. Isto interfere diretamente no poder de penetração do campo magnético.

Dados adicionais precisam ser colhidos para se determinar qual dos transdutores apresenta maior exatidão. Esta análise só poderá ser realizada comparando-se medidas obtidas por outros métodos que não sejam de indução magnética.

Para uma melhor calibração, todas as medidas devem ser comparadas com um perfil de cementação em tubos ou o perfil de um gabarito em cunha, confeccionado com amostras totalmente cementada de HP40.

Esta opção foi rejeitada em função da grande dificuldade encontrada na cementação deste material. Uma alternativa viável poderia ser atacar a matriz com reagente seletivo, recolhendo os carbetos para a confecção de um novo gabarito.

Obtendo-se a função de transferência $V(g)$, pode-se determinar a porcentagem de cementação em qualquer amostra.

No entanto, ao analisarmos as amostras com os transdutores, foi evidenciada atividade magnética externa (oriunda da mistura de óxidos), acusada pelo instrumento em forma de uma voltagem mínima (considera como voltagem de fundo de escala). Este valor representa a atuação da atmosfera do forno sobre as paredes externas do tubo. A superfície da camada de óxido protetor é bastante regular, facilitando o acoplamento do transdutor e o tubo. Porém, em termos eletromagnéticos, produz a perda do referencial nulo de cementação ou o “off set” do instrumento.

Para contornar este problema, pode-se adotar as seguintes medidas:

- 1- Instalar no forno um tubo referência, sujeitos às mesmas condições de trabalho. Qualquer outro tratamento interno deve ser evitado (tratamento químico de limpeza de coque, repassivação, etc.), mantendo-o sujeito apenas à atmosfera do forno. Faz-se a medida de voltagem com o transdutor neste tubo e obtém-se o “valor de fundo” e desconta-se dos valores encontrado em cada posição do tubo em operação. Porém este método é inviável uma vez que sem refrigeração o tubo seria rapidamente consumido pela atmosfera oxidante do forno.
- 2- Realiza-se a análise do tubo de forma normal. Em seguida remove-se a camada externa através de técnica de abrasão a baixa temperatura. Volta-se a executar as

medições nos mesmos pontos. Os valores adicionais contidos nas primeiras medidas fazem referência a cementação externa. *Não há necessidade de levar em conta a espessura do tubo na calibração – Tubos de HP40 apresentam atividade magnética nula na ausência de carbeto.* Apesar de tudo, este método também é inviável na prática pois a remoção do óxido protetor externo comprometeria as propriedades mecânicas do tubo. A remoção desta camada significa fragilização local.

Em virtude da necessidade, foi assumida cementação constante ao longo do tubo e, posteriormente, utilizado o segundo método modificado, com a remoção da camada interna ao invés da externa (mecanicamente mais fácil de ser removida).

4.8. Análise de Amostras Cementadas

A FIG. 75 apresenta o perfil de cementação encontrado pela técnica de pó magnético. Este *material revelado* será o ponto de partida para a calibração dos transdutores.

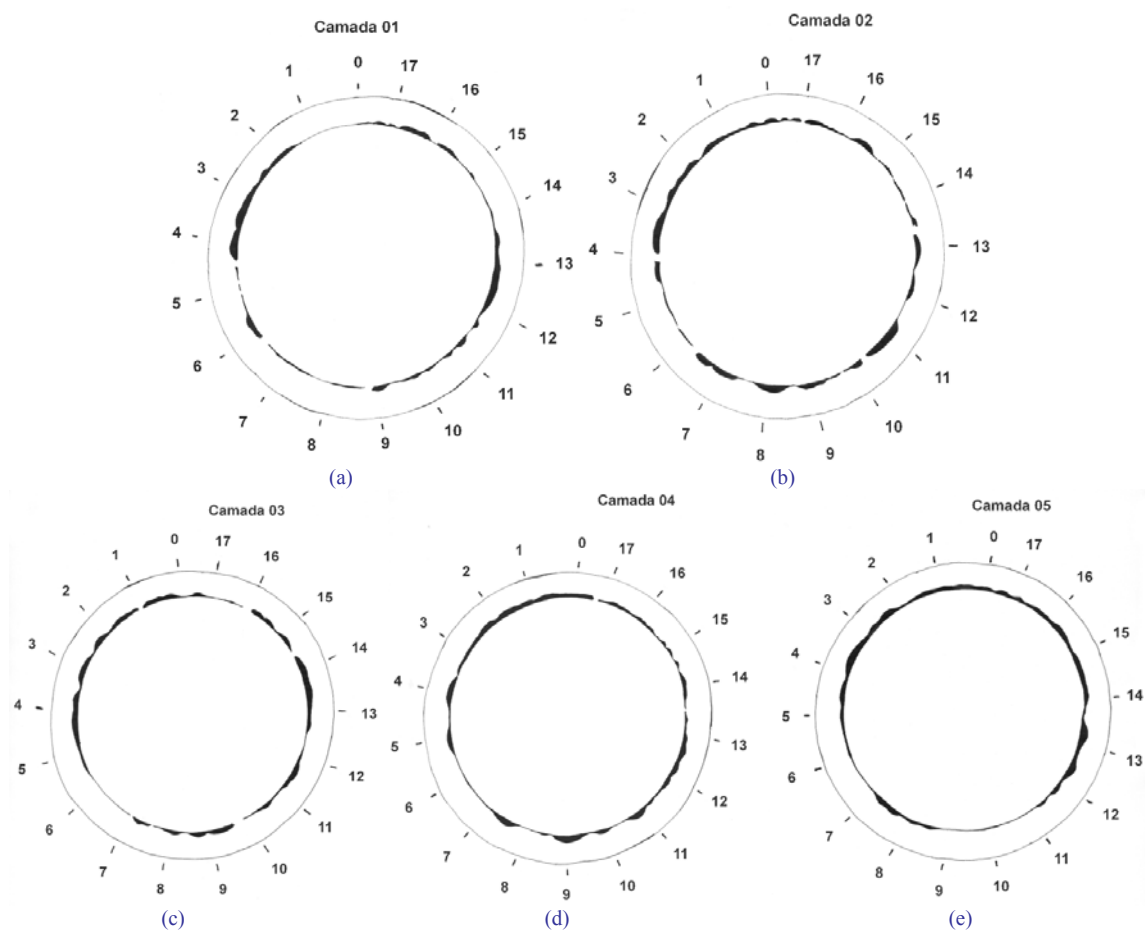


FIG. 75: Diagrama de cementação encontrado nas seções transversais das posições longitudinais (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04 e (e) 05

Uma melhor visualização do perfil de cementação experimental pode ser conseguido utilizando-se os valores de voltagem da TABELA 35 em um gráfico circular. Sua cons-

trução, bem como a calibração do transdutor foi realizada comparando-se três pontos de cada um dos perfis “revelados” com os obtidos experimentalmente por voltagem (pontos de referência circunferencial 04, 08, e 15).

Estabelecendo-se uma proporção entre estes valores e o diâmetro do tubo, obtém-se um fator de escala, válido para todo o gráfico. A título de exemplo, se 2mm de região cementada apresentasse 270 unidades, 45 mm de raio interno corresponderia a aproximadamente, 6000 unidades. A FIG. 76 apresenta esta proporção no gráfico circular.

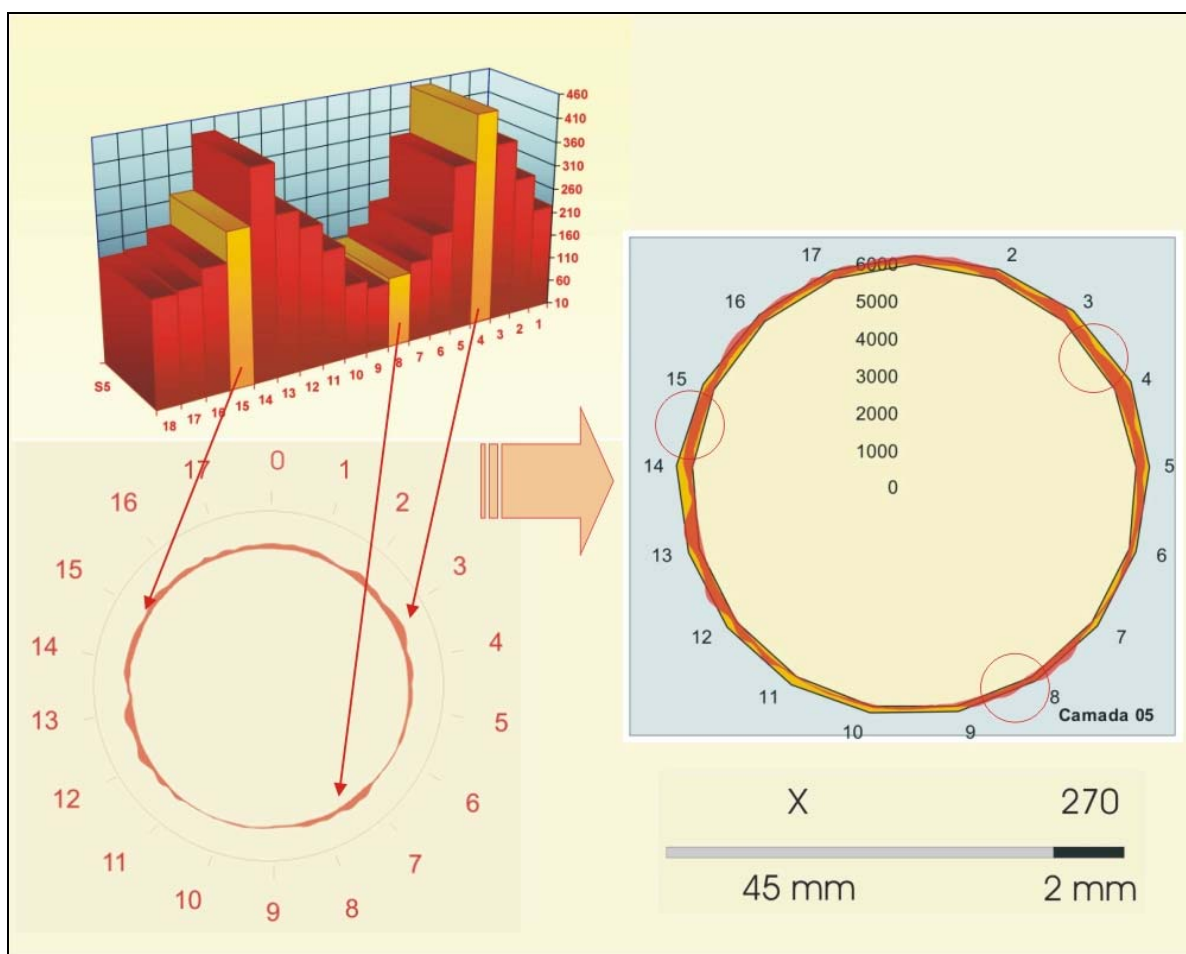


FIG. 76: Padrão de cementação adotado para calibração dos sensores

A FIG. 77 compara os perfis de cementação “revelado” de cada seção do tubo (cor vermelha), com aos valores experimentais, obtidos pelo *Transdutor Magnético 13* (em cor amarela).

O valor de voltagem do “raio interno” do tubo foi obtido pelo menor valor de voltagem encontrado na série, correspondendo ao nível “zero” de cementação.

Uma avaliação da precisão do transdutor pode ser realizada tomando-se 10 pontos aleatórios na direção radial e comparando os valores “revelado” e “experimental”.

Comparando-se os resultados, observa-se boa aproximação entre as regiões. Em média 80% dos pontos comparados coincidem. Porém, uma atenção especial deve ser dada às regiões 07 e 09 assinaladas com setas na FIG. 77. Estas regiões de cementação relativamente acentuada não foram percebidas pelo transdutor.

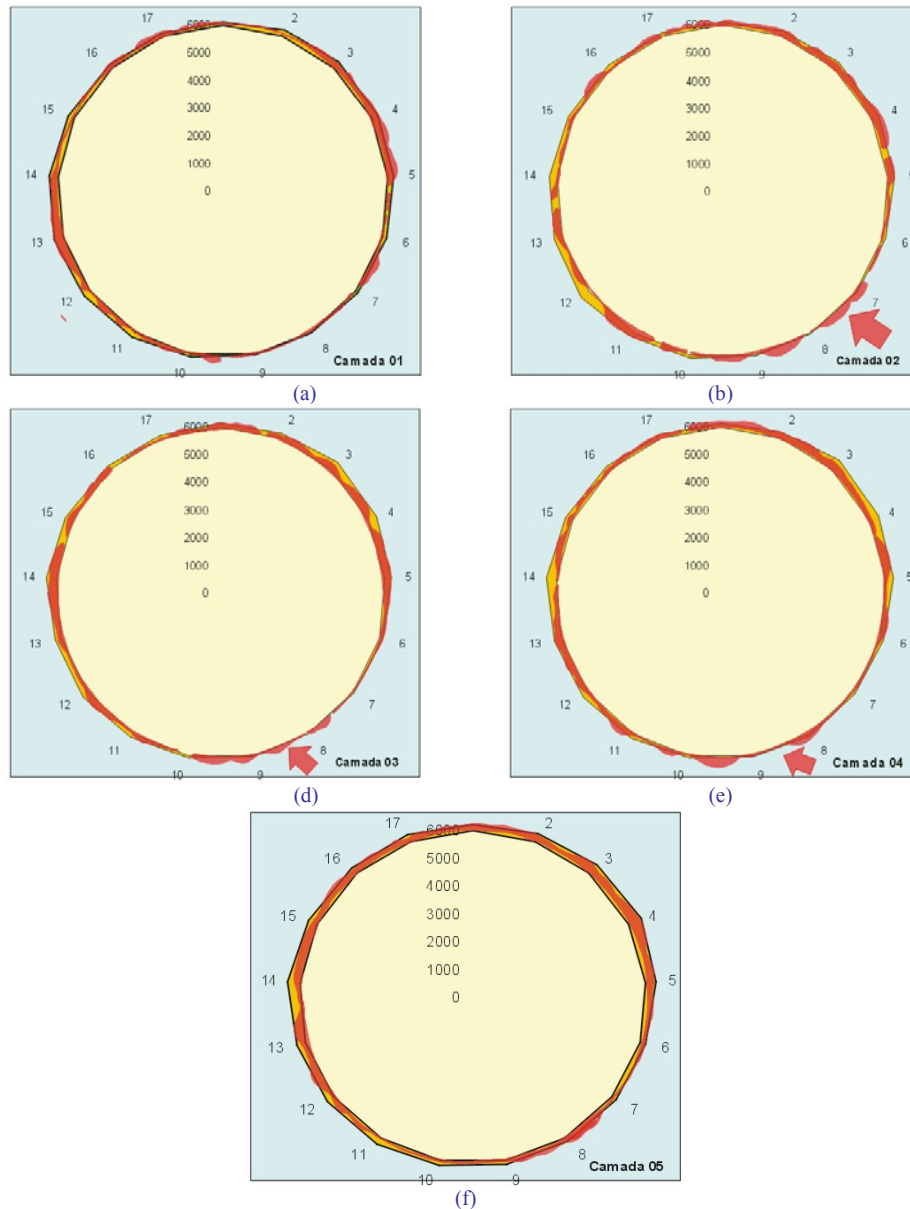


FIG. 77: Sobreposição dos perfis de cementação T.M.13 e os de pó magnético.

Dois fatores encontram-se presentes nesta aparente contradição:

1º) Analisando-se a superfície interna do tubo, verifica-se pouca penetração efetiva de carbono nas posições 07 e 09. Isto significa que as superfícies dos cortes transversais, não revelam o padrão volumétrico real da parede do tubo. Se for observado somente as duas superfícies das seções transversais, apresentadas na FIG. 78 é fácil concluir, erroneamente, que ambas apresentam cementação semelhantes.

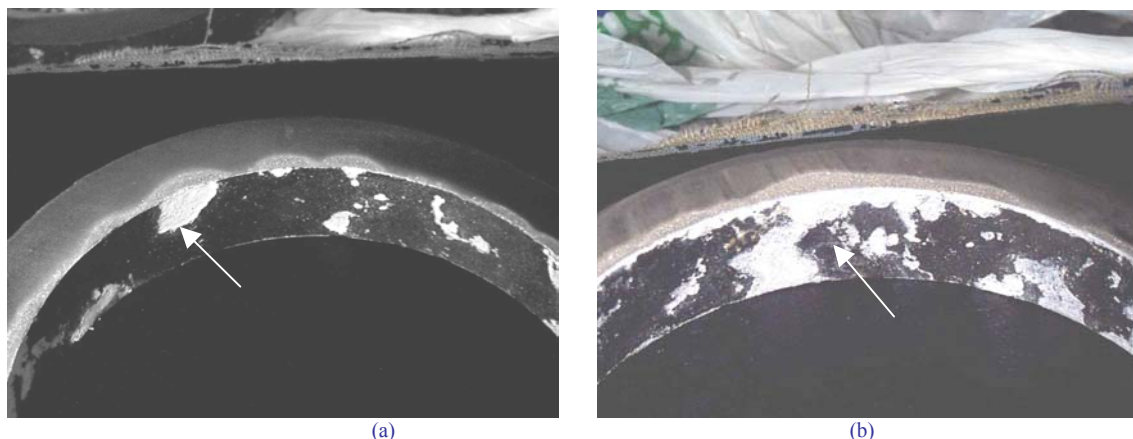


FIG. 78: (a) Região interna do tubo HP40 com poucas falhas na camada de óxido e (b) outra região fortemente atacada. Superficialmente apresentam semelhança de cementação.

As regiões realçadas artificialmente em branco correspondem às falhas na camada de óxido de cromo, dissolvido por superaquecimento ou descascado por tensões térmicas durante o processo de limpeza do coque. As regiões cementadas foram evidenciadas por ataque químico (Nace Standard TM0498-98 – Section 4).

2º) A superfície externa do tubo apresenta características magnéticas heterogênia, causada pela atmosfera do forno. A região frontal aos queimadores produz um aquecimento mais intenso que em regiões laterais. Subtrair o menor valor de voltagem de todas as medidas significa adotar um magnetismo externo uniforme, o que não corresponde à realidade.

Retirando-se a região cementada (6 mm de parede interna) da seção transversal 05, e voltando-se a inspecioná-la, é possível determinar a contribuição magnética externa. De posse destes valores o perfil de cementação pode ser avaliado pela subtração direta entre o valor lido anteriormente e o atual. Estes valores são apresentados na TABELA 14. A FIG. 79, associada a tabela esclarece o significado de cada coluna. Os valores de voltagem total estão na coluna “Média” (voltagem anteriormente medida) e aqueles referentes à parede externa, contendo apenas 3 mm externos da parede do tubo, na coluna “Externa”.

TABELA 14: Inspeção realizada pelo Transdutor Magnético 13 em tubo HP40 sem camada cementada retirada com auxílio de torno

Transdutor Magnético 13 - Tubo HP40							
		Voltagem (mV)	Desvio	Média	Externa	Interna	
Camada 05	0	482	490	8,0	486	221	265
	1	575	578	3,0	577	246	331
	2	648	651	3,0	650	231	419
	3	619	618	1,0	619	251	368
	4	465	470	5,0	468	318	150
	5	389	380	9,0	385	308	77
	6	364	373	9,0	369	229	140
	7	389	397	8,0	393	206	187
	8	399	404	5,0	402	187	215
	9	407	406	1,0	407	246	161
	10	481	481	0,0	481	359	122
	11	598	593	5,0	596	390	206
	12	622	625	3,0	624	393	231
	13	634	635	1,0	635	254	381
	14	555	551	4,0	553	172	382
	15	448	456	8,0	452	152	301
	16	425	425	0,0	425	144	282
	17	406	401	5,0	404	187	217

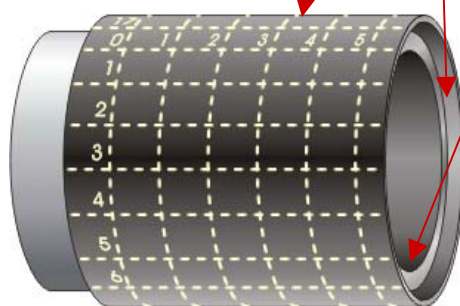


FIG. 79:Indicação das diversas camadas lidas nas colunas da tabela

A FIG. 80 compara os perfis de cementação obtidos pelo *Transdutor Magnético.13* considerando a camada externa de óxido homogênea e heterogênea. Vê-se, no segundo caso, um melhor ajuste, havendo 95% de coincidência entre perfil revelado e experimental.

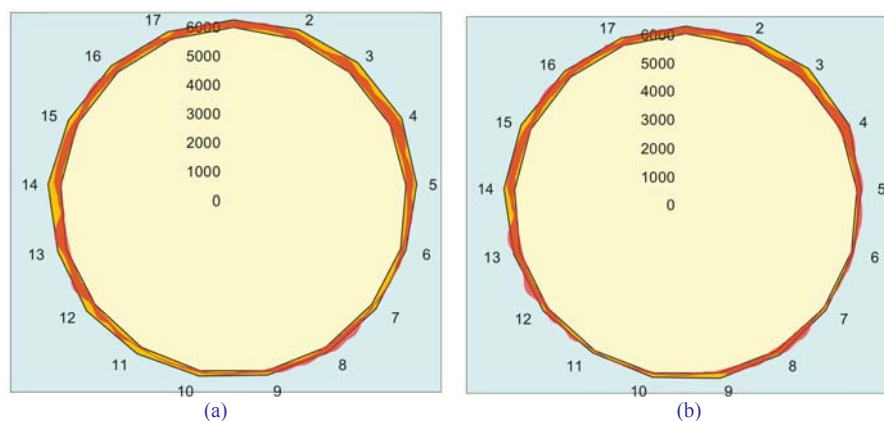


FIG. 80: (a) Camada 05 antes da remoção da região cementada
(b) Camada 05 após a remoção da região cementada e com valores de voltagem corrigidos

4.9. Transdutor Kubota

Um transdutor comercial utilizado para determinar a cementação em tubos de HP40 é fabricado pela Kubota Corporation. O princípio de funcionamento não está divulgado em literatura científica, nem fornecido pelos fabricantes por estar envolto em segredos industriais. Porém, pesquisando o aparelho com um *Transdutor de Efeito Hall*, pode-se verificar a inclusão de um ímã fixo no interior do elemento transdutor.

A .FIG. 81 apresenta o gabarito utilizado para calibragem do sensor. O material ferromagnético contido em seu interior não é da classe HP40, levando a acreditar que este aparelho tem função de alarme e não avaliação de cementação. Como o sensor encontra-se encapsulado em resina EPOX é possível contatar a presença de um ímã na região X e um elemento sensor na região Y. A alteração do caminho magnético seguido pelas linhas de indução são captadas pelo elemento sensor indicando presença de um elemento resistivo-magnético ou efeito Hall magnético.

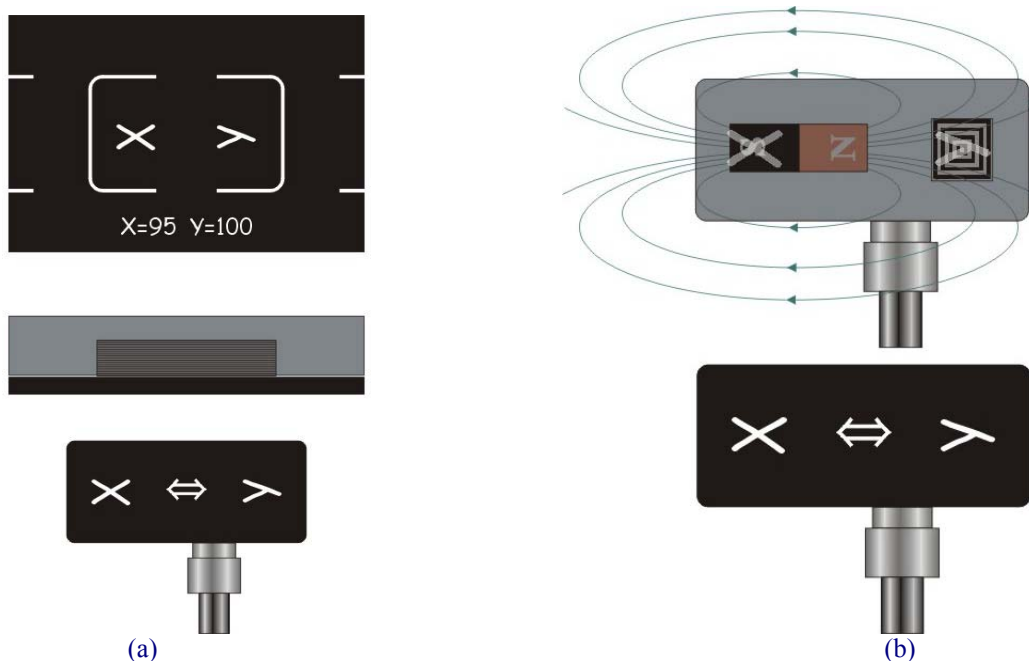


FIG. 81: Transdutor Kubota com (a) placas metálicas padrão e (b) a provável constituição interna.

A FIG. 81 indica a convenção de sentidos utilizados no *Transdutor Kubota* ao pesquisar o gabarito em cunha. É importante salientar que este transdutor não foi calibrado para o metal ABNT 1030. Tal procedimento deseja pesquisar as características do transdutor, extraindo relações que possam ser comparadas com os transdutores deste trabalho.

Este transdutor apresentou anisotropismo durante a análise. Adotando-se os sentidos mostrados na FIG. 82, foi possível obter os dados registrados na TABELA 15.

TABELA 15: Valores numéricos obtidos pelo Transdutor Kubota sobre o gabarito

		Valores Numéricos de “Porcentagem de Cementação”								
Lado A		78	72	68	62	56	51	47	43	39
		84	75	68	62	57	52	48	43	38
Média		81	74	68	62	57	52	48	43	39
Lado B		77	72	66	60	55	50	46	42	39
		77	71	66	61	55	50	46	42	39
Média		77	72	66	61	55	50	46	42	39
		1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2
		Espessura de entreferro (mm)								

As linhas designadas por Lado A e Lado B fazem referência ao posicionamento do transdutor sobre o gabarito, mostrado na FIG. 82.

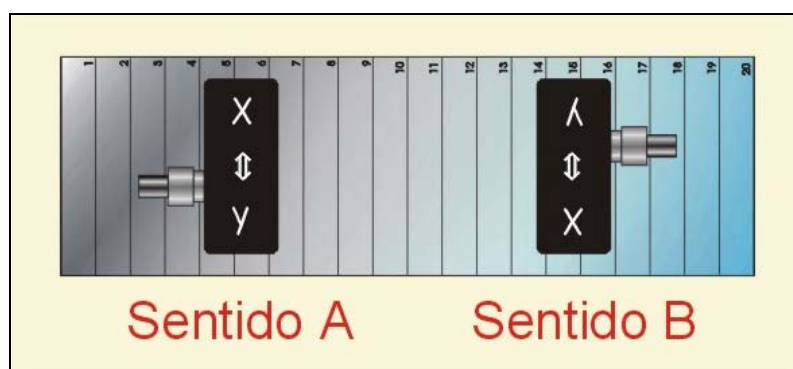


FIG. 82: Posicionamento do Transdutor Kubota sobre o gabarito em cunha

Estas medidas, quando o instrumento é utilizado segundo as especificações de fábrica, fornecem a porcentagem de cementação encontrada na amostra em uma área de aproximadamente 18 cm².

O gráfico contido na FIG. 83, obtido a partir da TABELA 15, apresenta uma relação linear entre espessura de entreferro e os valores numéricos registrados lidos pelo transdutor Kubota (possivelmente voltagem).

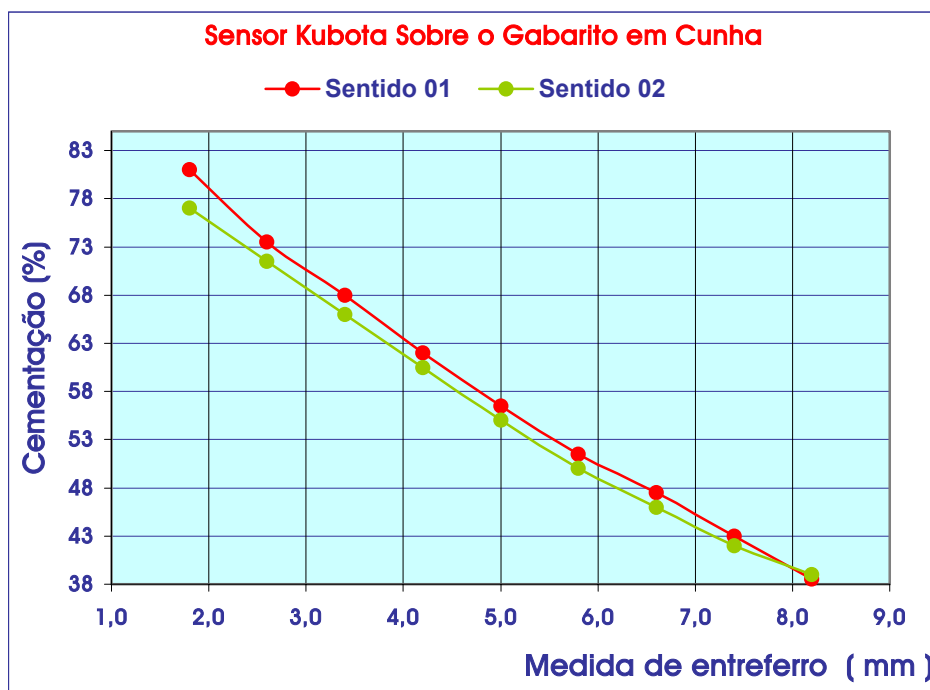


FIG. 83: Valores numéricos de porcentagem de cementação versus espessura de entreferro para o Transdutor Kubota

Um método para avaliar os dados obtidos pelo Transdutor Kubota é verificar o quanto este instrumento desvia em relação à porcentagem de material magnético colocado em suas proximidades. Esta porcentagem pode ser obtida no gabarito em cunha relacionando a espessura de material ferromagnético com a espessura total do gabarito. Estes valores são apresentados na TABELA 16 em “Porcentagem de Cementação Teórica”.

TABELA 16: Porcentagem real e teórica para o Transdutor Kubota em ABNT 1030

Espessura de entreferro								
1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	7,4	8,2
Porcentagem de Cementação Teórico								
82	74	66	58	50	42	34	26	18
Porcentagem de Obtida no Transdutor Kubota								
81	74	68	62	57	52	48	43	39

Comparando com o valor indicado pelo *Transdutor Kubota*, observa-se um desvio acentuado em valores inferior a 50%.

Outro aspecto importante deste transdutor comercial é uma aparente *insensibilidade à camada de óxido externa* ao tubo. Quando aproximado a tubos com forte característica ferromagnética na superfície externa, sua indicação registra “zero” de cementação.

Aplicando-se os *Transdutores Magnético 13* e *Kubota* a uma mesma amostra de HP40 construiu-se a TABELA 17.

TABELA 17: Ajuste entre Transdutor Magnético 13 e Transdutor Kubota

		Kubota Tubo HP40			Transdutor Magnético 13 Tubo HP40			Conversão	
		%	Média		Tensão	Média	a = 23 b = 13		
Referência Longitudinal	0	12	12	12	0	-0,14	-0,12	-0,13	10
	1	8	8	8	1	0,00	0,00	0,00	13
	2	12	12	12	2	-0,01	0,00	-0,01	13
	3	19	19	19	3	0,01	0,01	0,01	13
	4	25	25	25	4	0,23	0,19	0,21	18
	5	21	21	21	5	0,68	0,69	0,69	29
	6	26	26	26	6	0,89	0,91	0,90	34
	7	34	34	34	7	0,84	0,83	0,84	32
	8	33	33	33	8	0,81	0,80	0,81	32
	9	28	28	28	9	0,52	0,53	0,53	25
	10	27	27	27	10	0,14	0,15	0,15	16
	11	19	20	20	11	0,02	0,01	0,02	13
	12	19	19	19	12	0,06	0,06	0,06	14
	13	22	23	23	13	0,34	0,33	0,34	21
	14	22	22	22	14	0,52	0,50	0,51	25
	15	31	32	32	15	0,20	0,20	0,20	18
	16	31	30	31	16	-0,02	-0,02	-0,02	13
	17	18	18	18	17	-0,20	-0,20	-0,20	8
Conversão = Média *a + b									

Para ajustar a curva do *Transdutor Magnético 13* ao *Transdutor Kubota* foram utilizados dois fatores de correção: um multiplicativo (a) e outro aditivo (b), cuja conversão está descritos na última linha da TABELA 17.

Este procedimento corresponde à situação real de aumento de sensibilidade e variação de off set do condicionador de sinais.

A FIG. 84 compara as curvas dos transdutores.

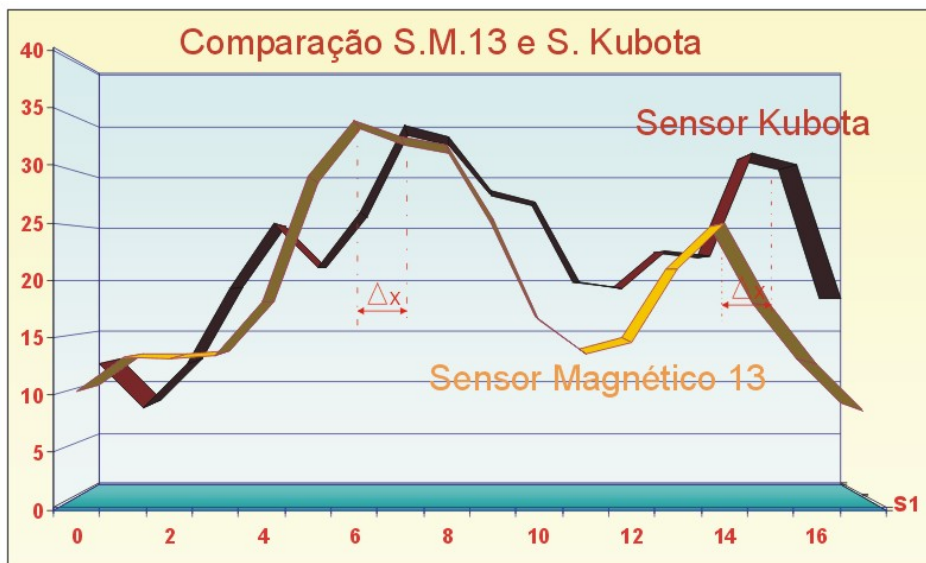


FIG. 84: Gráfico de porcentagem de cementação versus Espessura de Entreferro para o Transdutor Kubota

Os picos das curvas de cementação encontram-se defasados de um valor Δx ; esta tendência parece repetir-se ao longo do gráfico. Este fenômeno pode ser explicado pela construção do transdutor Kubota. Em primeiro lugar utiliza campo magnético contínuo, estando sujeito ao problema de histerese magnética. Isto é facilmente observado, mantendo o transdutor na mesma posição. A leitura aumenta gradativamente até um valor de equilíbrio. Em segundo, a leitura do instrumento no centro do transdutor não é a mesma do elemento sensor. Se for observada, o valor de defasagem 12 mm corresponde exatamente à distância entre o ímã e o centro do transdutor. Como os componentes estão imersos em EPOX, inacessível a investigação, julga-se que o elemento sensor esteja em posição simétrica em relação ao centro, justificando a falta de exatidão. Neste caso, não se pode justificar este desvio pela anisotropia do Transdutor Magnético 13 pois as medidas foram efetuadas no dois sentidos longitudinais

Capítulo 5: Conclusão

Após estudar as características do tubo HP40 através dos diversos transdutores construídos neste trabalho, verificou-se que:

1. A análise de amostras metálicas com os *Transdutores Magnéticos de 01 a 13* mostrou ser possível criar transdutores magnéticos com sensibilidade suficiente para detectar regiões cementadas (liga HP40 e outros similares) que apresente matriz de estrutura austenítica.

2. A precisão alcançada pelo *Transdutor Magnético 13* foi de aproximadamente 95% de coincidência entre perfis de cementação obtidos por deposição de pó magnético e o experimental. É conveniente alertar que esta porcentagem se refere a uma média global de cementação no tubo. Afirmar um percentual numérico exato seria um pouco temerário, uma vez que não existe uniformidade de cementação ao longo do tubo. Estando o transdutor ainda em fase de desenvolvimento pode-se estudar novas geometrias, no sentido de colimar ainda mais o campo magnético.

3. Os transdutores ao serem submetidos à interferência de finas camadas metálicas, mantiveram sua sensibilidade não sendo este um fator limitante na análise.

4. Os custos de pesquisa foram pequenos. Trata-se de um transdutor de construção simples, calibração e ajustes rápidos, com um mínimo de manutenção. Não foram incluídos gastos de reposição de pilhas, que em média podem durar entre 100 a 150 horas.

5. Após a modificação da geometria do entreferro, pela introdução de calços de EVA, os procedimentos de inspeção se resumem unicamente na pressão exercida no transdutor. Basta acoplar as duas superfícies e manter a mesma pressão ao longo da coleta de dados para se minimizar os erros operacionais. Este fator poderá ser futuramente otimizado através de um sistema mecânico de acoplamento.

6. Os *Transdutores Magnéticos 03 e 13* podem ser utilizados para avaliar o índice de cementação, diferenciando-se apenas pela intensidade de campo magnético.

7. Quando comparados com o Transdutor Kubota apresentou melhor desempenho. Por tratar-se de uma inovação, é susceptível de proteção industrial pelo sistema nacional de patentes.

Capítulo 6: Sugestões de Continuidade.

Os objetivos traçados no início da pesquisa foram alcançados. Porém, é importante lembrar que alguns pontos ainda devem ser pesquisados e receberem aprimoramento. Dentre eles pode-se enumerar:

- 1) Em alguns ensaios foram obtidos valores que, uma vez interpretados, conduzem a um diamagnetismo acentuado em ligas do tipo HP40.
- 2) As diferenças de leitura ocasionadas pela inversão de posição dos entreferos podem ser minimizadas mudando-se a geometria. A criação de um *Transdutor Magnético Cilíndrico* viria a condensar as linhas de campo magnético dirigindo-o totalmente para a região de análise. Este processo é empregado em medidores comerciais de tintas e camadas de revestimento. A FIG. 85 sugere detalhes de sua construção.

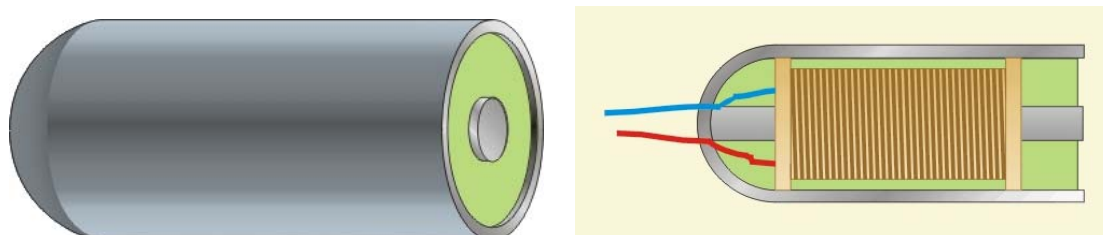


FIG. 85: Transdutor Magnético Cilíndrico, capaz de concentrar as linhas de indução magnética para a superfície de análise.

- 3) Aprimorar um novo *Transdutor Magnético* baseado no Efeito Hall Magnético e compará-lo com o Transdutor Magnético 03. Este experimento poderia ser simultâneo, bastando acoplar um transdutor Hall com baixo tempo de resposta ao entrefero do *Transdutor Magnético 03*. Porém é importante lembrar que este transdutor deve estar sujeito a um campo magnético oscilante ou estará sujeito aos efeitos de histerese magnética. Desta forma, este tipo de sensor pode tornar o transdutor muito complexo, inviabilizando uma possível comercialização.
- 4) Criar um gabarito de calibração contendo uma fina camada de metal HP40 cementado. Isto não pôde ser realizado até o momento pela dificuldade encontrada em cementar porções significativas da liga HP40. Um método alternativo seria atacar quimicamente uma porção de material cementado, separando os carbeto da matriz. Moldando o material colhido em uma fina película metálica pode-se acomodá-la entre duas cunhas acrílicas como indicado na FIG. 86.

De posse deste gabarito, calibra-se o transdutor para valores específicos de entreferro.

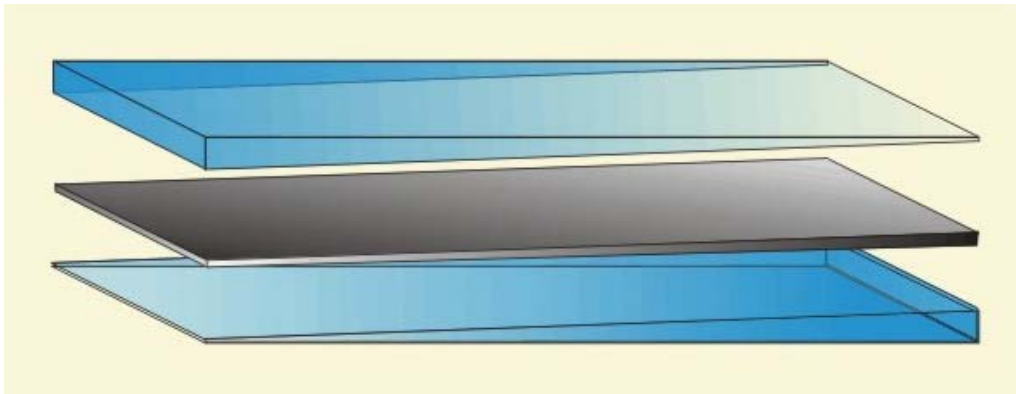


FIG. 86: Cunha duplo acrílico com lâmina metálica interna

- 5) Realizar uma análise na mesma amostra com o *Transdutor Kubota*, *Transdutor Magnético 03* e *Transdutor Magnético 13* comparando seus resultados.

Existe pequena diferença de leitura entre os Transdutores Magnéticos 03 e 13. Como a variação de intensidade magnética está relacionada com a penetração do campo magnético no material, talvez seja possível determinar a camada magnética externa por um transdutor e a total por outro, viabilizando a aplicação não destrutiva do transdutor.

- 6) A calibração dos transdutores pode ser mais precisa se for estudada as condições de saturação magnética destas amostras de HP40. Caso seja possível atingir a saturação, medidas com o *Transdutor Magnético 01* poderão tornar-se viáveis. Campos magnéticos constantes poderão ser empregados novamente. Esta solução não é fora de propósito, uma vez que o *Transdutor Kubota* emprega este método de detecção, porém com intensidade de campo abaixo da necessária para a saturação.

Capítulo 7: Bibliografia

- 7.1.- Brito, R. Machado Fundamentos de Instrumentação Para Monitoração e Controle de Processos. Escola de Engenharia – UFRGS – 1991.
- 7.2.- Martins, Nelson; Introdução à Teoria da Eletricidade e do Magnetismo. Edgard Blücher, 1975 - 2ª edição.
- 7.3.- Ralf J. Smith; Circuitos, Dispositivos e Sistemas. Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 1975.
- 7.4.- Vembu Gourishankar e Donald H. Kelly; Electromechanical Energy Conversion. Thomas Y. Crowell Company Ublishers, New York, 1973 – Secund Edition.
- 7.5.- E. Fitzgerald, Charles Kingsley e Alexander Kusko; Máquinas Elétricas. Makron Books do Brasil Ltda. São Paulo – 1975.
- 7.6.- James F. Shackelford, Introduction to Materials Science for Engineers, Prentice Hall -Fifth Edition
- 7.7.- Nelson Martins; Introdução à Teoria da Eletricidade e do Magnetismo. Editora Edgard Blücher Ltda, 1975 – 2ª. Edição
- 7.8.- Grabke, H.J. “Metal Dusting of Low and High-Alloy Steels.” Corrosion Science/1995 Vol.51, N° 9.
- 7.9.- Steurbaut C., Grabke H. J., Sobbe D., Buren F. R., Korf S. J. e Defrancq J. “Kinetic Studies of Coke Formation and Removal on HP40 in Cycled Atmospheres at High Temperatures”- Materials and Corrosion 49, 352-359(1998).
- 7.10.- H.J. Grabke, “Carburization: A High Temperature Corrosion Phenomenon. Part II: Best Practices for Testing Alloys,” MTI Publication No. 52 (St. Louis, MO: MTI).

- 7.11.- Metals and Alloys in the Unified Numbering System (latest revision), a joint publication of the American Society for Testing and Materials (ASTM) and the Society of Automotive Engineers Inc. (SAE), 400 Commonwealth Dr., Warrendale, PA 15096.
- 7.12.- ASTM G 79 (latest revision), "Standard Practice for Evaluation of Metals Exposed to Carburization Environments" (West Conshohocken, PA: ASTM).
- 7.13.- ASTM 353 (latest revision), "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Stainless, Heat-Resistant, Maraging, and Other Similar Chromium-Nickel-Iron Alloys" (West Conshohocken, PA: ASTM).
- 7.14.- ASTM E 1019 (latest revision), "Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel and in Iron, Nickel, and Cobalt Alloys" (West Conshohocken, PA: ASTM).
- 7.15.- Agarwal, D.C., and U. Brill. "Combating High Temperature Environmental Degradation By Testing Existing New Nickel and iron Base Alloys." CORROSION/94, paper No. 403. Houston, TX: NACE, 1994.
- 7.16.- Agarwal, D.C., U. Brill, and U. Heubner. "Alloys and High Temperature Environments - The Cost Effective Approach for Material Selection." CORROSION/92, paper No. 309. Houston, TX: NACE, 1992.
- 7.17.- ASM Handbook, Vol. 11: Failure Analysis and Prevention. 9th ed. "Elevated-Temperature Failures." Materials Park, OH: ASM International, 1986: pp. 263-297.
- 7.18.- ASM Handbook, Vol. 13: Corrosion. 9th ed. "High Temperature Corrosion." Materials Park, OH: ASM International, 1987: pp. 99-100.
- 7.19.- ASM Metals Handbook, Desk ed. "Heat-Resistant Materials." Materials Park, OH: ASM International, 1985: pp. 16:16-26.

- 7.20.- ASTM A 340 (latest revision). "Standard Terminology of Symbols and Definitions Relating to Magnetic Testing." West Conshohocken, PA: ASTM.
- 7.21.- ASTM E 3 (latest revision). "Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens." West Conshohocken, PA: ASTM.
- 7.22.- ASTM E 340 (latest revision). "Standard Test Method for Macroetching Metals and Alloys." West Conshohocken, PA: ASTM.
- 7.23.- Baboian, R. Corrosion Tests and Standards. West Conshohocken, PA: ASTM, 1995.
- 7.24.- Bagnoli, D.L., and J.J. Krupowicz. "Experiences with Ethylene Heater Tube Carburization." CORROSION/92, paper No. 307. Houston, TX: NACE, 1992.
- 7.25.- Brill, U. "Mathematical Description of Carburization Behavior of Various Commercial Heat-Resistant Alloys." Proceedings of the First International Conference on Heat-Resistant Materials, held September 23-26, 1991. Fontana, WI: ASM International, 1991.
- 7.26.- Collins, P.A. "Effect of Elevated Temperature Exposure on the Mechanical Properties of a Cast Niobium Containing Alloy." CORROSION/80, paper No. 170. Houston, TX: NACE, 1980.
- 7.27.- Fontana, M.G., and N.D. Green. "Oxidation and Other High-Temperature Metal-Gas Reactions." Corrosion Engineering. New York, NY: McGraw-Hill, 1967.
- 7.28.- Grabke, H.J., and A. Schnaas. "Review on High Temperature Gaseous Corrosion and Mechanical Performance in Carburizing and Oxidizing Environments." Proceeding of the Petten International Conference. Petten, Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1978.
- 7.29.- Hall, D.J., and J.J. Jones. "The Carburization Behavior of Steels for Petrochemical Plants." Proceedings of the Petten International Conference. London, England: Elsevier Applied Science, 1985.

- 7.30.- Hall, D.J., J.J. Jones, and M.K. Hossain. "Factors Affecting Carburization Behavior of Austenitic Steels." MP24, 1 (1985): p. 25.
- 7.31.- Heubner, U.K. Drafaehl, and J. Henrich. "Creep Strength and Creep Ductility of Welded Heat Resistant Materials in a Carburizing Environment." Proceedings of the First International Conference on Heat-Resistant Materials, held September 23-26, 1991. Fontana, WI: ASM International, 1991.
- 7.32.- Jaske, C.E. "The Effects of High Temperature Exposure on the Properties of Heat-Resistant Alloys." CORROSION/94, paper- No. 397. Houston, TX: NACE, 1994.
- 7.33.- John, R.C. "Alloy Carburization and Testing in Simulated Process Gases at 1800-1950°F." CORROSION/95, paper No. 460. Houston, TX: NACE, 1995.
- 7.34.- Kane, R.H. "Carburization of Cast Heat-Resisting Alloys in Synthetic Petrochemical Environments." CORROSION/83, paper no. 266. Houston, TX: NACE, 1983.
- 7.35.- Kane, R.H. "Effects of Silicon Content and Oxidation Potential on the Carburization of Centrifugally Cast HK-40." CORROSION/80, paper No. 168. Houston, TX: NACE, 1980.
- 7.36.- Krikke, R.H., J. Hoving, and K. Smit. "Monitoring the Carburization of Furnace Tubes in Ethylene Plants." CORROSION/76, paper- No. 19. Houston, TX: NACE, 1976.
- 7.37.- Lai, G.Y. "A New Chemical Process no. 310. Houston, High Temperature Alloy for the Industry." CORROSION/92, paper TX: NACE, 1992.
- 7.38.- Lancaster, J.F. "Materials for the Petrochemical industry." International Metals Reviews 23, 3 (1978): pp. 127-132.

- 7.39.- Lin, J.Y., F.C. Chiang, H. Gang, and C.C. Su. "The Field Measurement of Carburization and Oxidation of Ethylene Furnace Tubes by Multi-Technique Method." CORROSION/94, paper No. 184. Houston, TX: NACE, 1994.
- 7.40.- Mitchell, G.R.D., D.J. Young, and W. Kleeman. "Carburization-Oxidation of Heat Resistant Austenitic Steels." CORROSION/92, paper No. 302. Houston, TX: NACE, 1992.
- 7.41.- Mucek, M.W. "Laboratory Detection of Degree of Carburization in Ethylene Pyrolysis Furnace Tubing." CORROSION/83, paper No. 296. Houston, TX: NACE, 1983.
- 7.42.- Saori, M., and S. Ohta. "Carburization and Its Prevention in Ethylene Cracking Furnace Tubes." Proceedings of JIMIS -3: High Temperature Corrosion, Transactions of the Japan Institute of Metals. Tokyo, Japan: Japan Institute of Metals, (1993): pp. 691-698.
- 7.43.- Smith, P.J., O. Van der Biest, and J. Corish. "Initial Stages of High-Temperature Corrosion of Commercial Fe-Cr-Ni Alloys in a Carburizing Atmosphere of Low Oxygen Partial Pressure." Oxidation of Metals 24, 5/6 (1985): pp. 277-314.
- 7.44.- Su, Chun-Chi, and Kuo-Zein Chen. "17 Years Operating Experience with the FeCrNi Centrifugally Cast Furnace Tubes in Process Plants." CORROSION/93, paper no. 228. Houston, TX: NACE, 1993.

Capítulo 8: Apêndices:

8.1. Apêndice 01:

NACE - TM0498-98 - Métodos Padronizados Para Mensuração de Cementação em Ligas Usadas Para Cracking de Etileno em Tubos de Alto Forno.

Seção 1: Geral

1.1.- Atualmente não existe um método padronizado para avaliação da resistência relativa a cementação de várias ligas usadas em tubos de forno de pirólise de etileno. A publicação n° 52 da MTI apresenta diretrizes para o desenvolvimento de padrões, estabelecendo métodos para testes de cementação para diversas aplicações e procedimentos para a avaliação destes resultados. Este padrão NACE dirige-se a estes últimos e não aos demais, e ainda, somente à ligas e tubos de emprego em fornos de pirólise de etileno. Este padrão NACE não objetiva padronizar todos os métodos para teste de cementação.

1.2.- Dados de cementação de ligas específicas e ligas padronizadas, tais como UNS J94204, tem sido desenvolvidos por fornecedores de tubos. Por causa da variação no teste e métodos de avaliação, tentamos comparar dados de cementação de um e outro fornecedor, em faixas específicas de temperatura, nem sempre encontrado resultados consistentes. Este método, agora apresentado, proporciona um meio para avaliar algumas disparidades envolvidas na interpretação de dados de cementação, apresentado por fornecedores. O usuário deste padrão poderá notar que os testes de cementação usados para uma grande faixa de ligas são equivalentes.

1.3.- O método para medir resistência relativa à cementação estabelecido por este padrão não deve ser usado como informe em relação a possíveis conseqüências de cementação em geral ou para casos particulares de desenhos de alto forno. Nem deve ser assumido como base à projetos de vida parcial ou total de tubos cementado.

1.4.- Usuários de dados de cementação determinados por este método são responsáveis pelo desenvolvimento de critérios próprios de avaliação e aplicação às suas necessidades.

1.5.- A avaliação das propriedades mecânicas e a extensão na qual elas podem ser afetadas por vários graus de cementação, não estão incluídos no objetivo deste trabalho.

Seção 2: Definições

2.1.- Cementação é definida como a absorção do carbono pelo entorno de uma liga em teste de laboratório ou em ambiente de serviço, resultando em modificações (ou efeito) em suas propriedades ou desempenho.

2.2.- Ligas usadas para cracking de etileno em tubos de alto forno em geral incluem aços forjados e fundidos resistentes ao calor, com variações na quantidade de Ni, Cr, Fe e adição de pequenas quantidades de outros elementos. Exemplos incluídos, não de forma restritiva para UNS NO 8811, UNS J94204, ACI HP-45 (com várias modificações), e variações da liga 45Ni-35Cr.

Seção 3: Método de Análise por Combustão

3.1.- Geral

3.1.1.-Este método envolve um procedimento padronizado para determinação de perfil de carbono em material cementado por meio de análise de combustão de camadas sucessivas, retiradas de uma espécie analisada. O resultado final é uma curva do perfil de carbono, desenvolvido através de um gráfico de média de carbono contido em cada camada versus a profundidade do ponto médio do qual a camada se encontra, em relação à superfície primeiramente exposta ao ambiente cementante. Este processo é definido na ASTM G79, o qual pode ser seguida e realizada neste método. Este método é mais complicado e dispendioso que outros procedimentos alternativos.

3.1.2.-Existem três principais métodos para análise de combustão de carbono. Estes incluem a absorção de infravermelho, condutividade térmica e método gravimétrico. Estes padrões usam o método infravermelho o qual a ASTM G 79 reconhece como sendo o mais preciso. Este, além disso, requer menos tempo e preparação de amostras que os demais métodos.

3.2.- Preparação da Amostra

3.2.1.-Se as espécies do teste forem removidas de exposições laboratoriais, a primeira superfície exposta à cementação deve ser analisada. As camadas removidas podem iniciar-se nesta superfície.

3.2.2.-Se as espécies testadas forem removidas de tubo em exposição em serviço, um ímã ou um medidor de cementação deve ser empregado para localizar as áreas cementadas. Uma seção representativa do tubo deve ser removida, usando técnicas de corte a frio, para não ocasionar superaquecimento. As superfícies cortadas devem ser alisadas com esmeril ou jateamento de areia e a superfície de exposição limpa com jatos de esferas de vidro. A seção deve ser colocada em um campo magnético e pó magnético seco (ou suspenso em acetona) e aplicado à superfície preparada. A resposta das linhas de indução magnética irá definir qualitativamente a extensão e o padrão de cementação. A cementação, geralmente estende-se além das linhas de indução magnética. Desta forma, as camadas removidas não devem parar no limite das linhas. Respostas representativas de linhas magnéticas são mostradas nas FIG. 87.

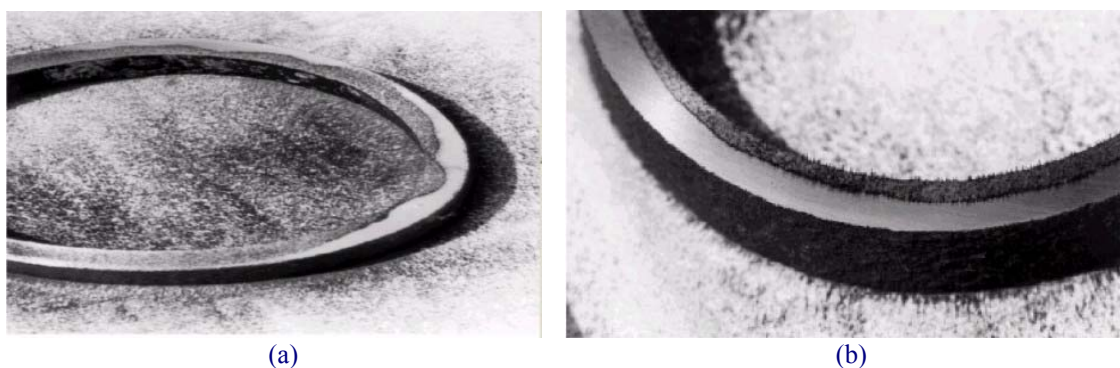


FIG. 87: (a) Uma resposta de linhas magnéticas irregulares em tubos da série HP45 e similares
(b) Uma resposta de linhas magnéticas regular em tubos da série HP45 e similares

FIG. 87(a) - Resposta de linhas magnéticas irregulares. A distribuição de partículas magnéticas define a área cementada, localizando-se na superfície interna do tubo. Pela análise de combustão, camadas desta seção devem ser removidas em faixas longitudinais.

FIG. 87(b) - Uma resposta de linhas magnéticas regular. Uma resposta relativamente uniforme é mostrada pela distribuição de partículas magnéticas.

3.2.3.-Se as respostas das linhas de indução magnética não forem uniformes, a seção do tubo (FIG. 87a), uma tira longitudinal deve ser removida na área de maior interesse. Camadas devem ser retiradas desta tiras. Se as respostas das linhas de indução forem uniformes em volta da seção transversal do tubo (FIG. 87b), camadas circulares devem ser removidas para análise.

3.2.4.-Para a remoção da primeira camada, a espécie testada deve ser limpa e removida de sua superfície qualquer contaminação. Jato de esferas de vidro são preferíveis, porém outros métodos de limpeza suave podem ser aplicados. A espécie testada deve ser primeiramente desengordurada antes de ser processada.

3.3.- Camada Removida

3.3.1.-Camadas devem se removidas por freza ou torno. Não deve ser usado lubrificante ou líquido refrigerante durante o processo.

3.3.2.-A espessura das três primeiras camadas removida deve ser 0,050 mm (0,020 in.) cada uma. A espessura das camadas sucessivas pode ser aumentada para 0,130 mm (0,050 in.) cada. No final, duas camadas além da resposta das linhas de indução magnética devem ser removidas. Se uma precisão maior for necessária, a espessura das camadas pode ser reduzida para 0,010 e 0,020 mm (0,004 e 0,008 in.).

3.3.3.-Aparas de cada camada devem ser coletadas em amostras separadas e rotuladas de acordo com a designação e profundidade da espécie testada. A quantidade mínima de amostra para análise de combustão é um grama por análise. Suficiente material deve ser disponível para executar duas análises por camada, ou uma por análise e uma em amostra reserva por camada. O tamanho da espécie analisada deve ser selecionado de acordo com este proceder.

3.4.- Análise de Carbono e Apresentação dos Dados

3.4.1.-A amostra de cada camada deve ser analisada pelo método de infravermelho. O método de condutividade térmica pode ser considerado se este for o único método realmente disponível. ASTM E 353 e ASTM E 1019 ilustra o método analítico para determinar o conteúdo total de carbono usando o método de combustão.

3.4.2.-A análise dos resultados deve ser apresentado na forma gráfica com porcentagem de carbono versus a distância do ponto médio de cada camada em relação a superfície onde a cementação foi iniciada. dispostos em um gráfico

Seção 4: Método de Ataque Químico

4.1.- Geral

4.1.1.-Este teste envolve o teste padrão de ataque químico para medidas semiquantitativa da extensão de cementação de ligas usadas para craking de etileno em tubos de alto forno. Este método pode ser usado para avaliar a cementação em diferentes ligas expostas a cementação laboratorial ou removidas de operação em fornos.

4.1.2.-Para definir semiquantitativamente a extensão e o perfil de carbono adquirido pela amostra, este método apresenta suficiente precisão para comparar a adequação de diferentes ligas à novas construções, desde que seguido de testes de cementação laboratoriais. Pode também ser utilizado para avaliar o perfil de carbono nas seções transversais de tubos expostos em serviço, representando desta forma as diferentes temperaturas ao longo da tubulação, como mostra a FIG. 88.



FIG. 88: Seções de um tubo HP40 atacado com áreas cementadas, reveladas por método químico.

FIG. 88- Quatro seções de um tubo delgado atacado pelo método químico mostrando o grau de cementação ao longo do comprimento de uma simples seção do tubo como função da localização e temperatura do metal.

4.1.3.-Este método apresenta uma aproximação relativamente pequena que pode ser realizada por muitos laboratórios. Métodos mais precisos, enquanto quantitativo, podem não necessariamente, resultar em aprimoramento em projetos ou decisões de controle operacional.

4.2.- Preparação das espécies para teste

4.2.1.-A remoção de espécies para teste de tubos expostos às condições de serviço deve ser feita com técnicas de corte a frio que não superaqueça a área transversal a ser examinada.

4.2.2.-Um mínimo de duas espécies para teste de mesmo aquecidas e cementadas sob idênticas condições devem ser testadas usando este método de ataque. As espécies testadas devem ter geometria uniforme, superfície bem acabada e espessa. Material não exposto ao aquecimento devem ser mantidos como referência.

4.2.3.-Após a utilização das técnicas laboratoriais normais para cementação, as espécies devem ser polidas com sucessiva lixas até 400 a 600 grit.

4.2.4.-Continue polindo usando pasta de diamante (disco de feltro para exame de microestrutura metalográfica podem também ser utilizados)

4.3.- Ataque

4.3.1.-A solução de ataque pode ser uma mistura de 20 % em peso de ácido nítrico (HNO₃) e 4 % em peso de ácido fluorídrico (HF). Esta solução deve ser recentemente preparada, usando técnicas e procedimentos normais de laboratório, incluindo as precauções apropriadas de segurança para misturar 200 cc de concentração 70 % peso de HNO₃ com 70 cc de concentração 49 % peso de HF e 670 cc de água destilada. Um atacante alternativo, glicerinado, usado antigamente, não deve ser usado com esta padronização.

4.3.2.-A solução de ataque deve ser transferida para um recipiente plástico (polipropileno ou polietileno).

4.3.3.-As espécies devem ser imersas na solução de ataque. As superfícies polidas das espécies testadas devem estar para cima. Esta orientação garante completa exposição e evita a criação de gretas nas superfícies polidas.

4.3.4.-As espécies devem ser imersas na solução por duas horas, em temperatura ambiente (20 °C). Após a imersão, as espécies devem ser removidas da solução, enxaguadas com água e secas.

4.3.5.-Este procedimento ataca suficientemente os carbetos, tanto que a região cementadas e a não cementada são visivelmente evidenciadas.

4.4.- Avaliação dos Resultados

4.4.1.-As superfícies polidas das espécies devem ser examinadas visualmente. Esta pode ser melhorada, utilizando um aumento superior a 100X. As espécies devem ser classificadas de acordo com a profundidade da região de cementação revelada pelo ataque.

4.4.2.-Os resultados dos testes devem ser relatados através de fotografias das seções transversais. Uma escala apropriada pela qual a espessura e a relativa profundidade de cementação possam ser avaliadas devem ser incluídas.

4.4.3.-A fotografia deve ter no total 75 por 130 mm e a espessura de parede não menos que 80 % da espessura real. Por exemplo, uma espessura de 6,4 mm de espessura de parede não deve aparecer com menos que 5,1 mm na fotografia.

4.4.4.-A profundidade de cementação descrita em cada espécie deve ser medida a partir da superfície onde a cementação teve início. A espessura total da espécie também deve ser especificada. Se a espécie analisada foi exposta por todos os lados um paquímetro ou um micrômetro nas posições inicial e final deve ser colocado para referência.

4.4.5.-Para espécies tubulares, a profundidade de cementação deve ser apresentada como uma porcentagem da espessura da parede a partir do centro, que é a superfície de exposição. Para espécies que tenham sido expostas à cementação ambiente em todas as superfícies, o grau de cementação deve ser apresentado como uma porcentagem da seção transversal testada.

4.4.6.-Aparecimento de manchas ou não uniformidade de cementação devem ser escritas como descrição do ataque.

8.2. Apêndice 02:

Estudo do Campo Magnético Através da Geometria e dos Transdutores

O estudo do campo magnético disperso nos transdutores foi executado através de protótipos, uma vez que a pura análise teórica é ineficiente e em muitos casos impossível. Saber como as medidas são afetadas pela heterogeneidade do campo, dimensões dos transdutores e material magnético empregado no núcleo são questões a serem pesquisadas.

Para se utilizar o mesmo padrão em todas as medidas, adotou-se como referência a mesma leitura de corrente na posição 180 mm sobre o gabarito (147,0 mA). A sensibilidade foi calculada em valor percentual (desvio relativo) de acordo com a expressão:

$$S\% = \frac{I(18) - I(2)}{I(2)} \cdot 100, \text{ onde } I(x) = \text{corrente elétrica na posição } x \text{ sobre o transdutor.}$$

8.2.1. Transdutor Magnético 04

A TABELA 18 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 04.

TABELA 18: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 04

Transdutor Magnético 04	Distâncias (cm)	400		1000		2000	
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)
		2	0,1250	1,451	0,1275	3,437	0,1311
4	0,1300	1,444	0,1316	3,432	0,1347	6,913	
6	0,1330	1,438	0,1346	3,428	0,1370	6,907	
8	0,1360	1,434	0,1374	3,425	0,1390	6,903	
10	0,1390	1,430	0,1398	3,423	0,1409	6,895	
12	0,1410	1,427	0,1420	3,419	0,1428	6,893	
14	0,1430	1,424	0,1440	3,416	0,1445	6,889	
16	0,1450	1,421	0,1459	3,415	0,1460	6,884	
18	0,1470	1,418	0,1476	3,412	0,1473	6,882	
S%		18	2	16	1	12	1

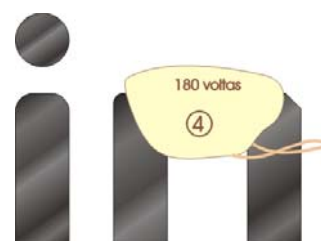


FIG. 89: Transdutor Magnético 04

Este transdutor tem núcleo de ferrite e possui a bobina localizada na posição simétrica em relação aos entreferros. O formato da ferrite é o mesmo encontrado em Flyback de televisores. As áreas transversais dos entreferros são iguais.

Este transdutor apresentou baixa sensibilidade (16% em corrente a 1kHz) em valores altos de tensão.

8.2.2. Transdutor Magnético 05

A TABELA 19 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 05.

TABELA 19: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 05

Transdutor Magnético 05	Distâncias(cm)	400		1000		2000	
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)
		2	0,1327	1,934	0,1348	4,729	0,1362
4	0,1357	1,930	0,1375	4,725	0,1398	9,602	
6	0,1383	1,929	0,1397	4,723	0,1406	9,599	
8	0,1401	1,926	0,1413	4,720	0,1420	9,596	
10	0,1419	1,927	0,1428	4,720	0,1432	9,594	
12	0,1432	1,925	0,1441	4,718	0,1444	9,593	
14	0,1446	1,925	0,1453	4,717	0,1455	9,590	
16	0,1457	1,924	0,1463	4,715	0,1463	9,590	
18	0,1467	1,925	0,1472	4,715	0,1471	9,590	
S%		11	0	9	0	8	0

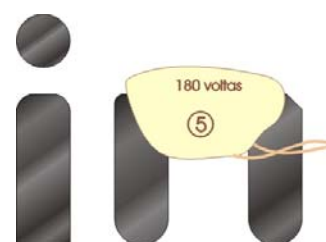


FIG. 90: Transdutor Magnético 05

Este transdutor tem núcleo de ferrite e possui bobina localizada na posição simétrica em relação ao entreferro. As áreas transversais dos entreferros têm formas cilíndricas. Este transdutor apresentou sensibilidade (9% em corrente a 1kHz) inferior ao Transdutor Magnético 04. Os valores de voltagem são altos.

8.2.3. Transdutor Magnético 06

A TABELA 20 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 06.

TABELA 20: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 06

Transdutor Magnético 06	Distâncias(cm)	400		1000		2000	
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)
		2	0,1357	1,995	0,1359	4,722	0,1374
4	0,1388	1,956	0,1370	4,655	0,1397	9,302	
6	0,1405	1,934	0,1406	4,610	0,1413	9,228	
8	0,1424	1,911	0,1422	4,572	0,1424	9,172	
10	0,1439	1,890	0,1436	4,540	0,1435	9,121	
12	0,1450	1,874	0,1448	4,509	0,1447	9,065	
14	0,1460	1,862	0,1460	4,482	0,1455	9,023	
16	0,1470	1,850	0,1469	4,461	0,1464	8,983	
18	0,1478	1,841	0,1477	4,443	0,1470	8,954	
S%		9	8	9	6	7	5

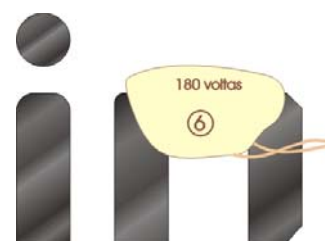


FIG. 91: Transdutor Magnético 06

Este transdutor tem núcleo de ferrite e possui bobina na posição simétrica em relação ao entreferro. As áreas transversais dos entreferros são diferentes, tendo sensibilidade aproximada de 9% em corrente a 1kHz (semelhante ao *Transdutor Magnético 05*). Os valores de voltagem são altos.

8.2.4. Transdutor Magnético 07

A TABELA 21 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 07.

TABELA 21: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 07

Transdutor Magnético 07	Distâncias (cm)	400		1000		2000	
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)
		2	0,1397	1,657	0,1396	3,935	0,1407
4	0,1415	1,633	0,1413	3,894	0,1422	7,820	
6	0,1428	1,614	0,1425	3,864	0,1432	7,772	
8	0,1438	1,600	0,1436	3,837	0,1441	7,734	
10	0,1449	1,586	0,1446	3,814	0,1449	7,698	
12	0,1458	1,574	0,1454	3,794	0,1456	7,664	
14	0,1464	1,566	0,1463	3,775	0,1463	7,631	
16	0,1470	1,556	0,1468	3,758	0,1470	7,605	
18	0,1477	1,548	0,1476	3,744	0,1476	7,586	
S%		6	7	6	5	5	4

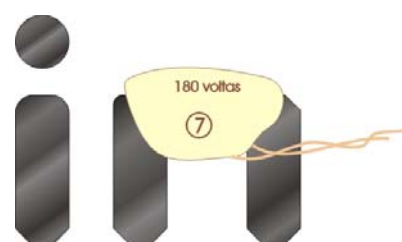


FIG. 92: Transdutor Magnético 07

Este transdutor tem núcleo de ferrite e possui bobina localizada na posição simétrica em relação ao entreferro. As áreas transversais dos entreferros são retangulares e planas (área menor de um tronco de pirâmide). Apresentando sensibilidade de 6% em corrente a 1kHz e valores altos de tensão.

8.2.5. Transdutor Magnético 08

A TABELA 22 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 08.

TABELA 22: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 08

Transdutor Magnético 08	Distâncias (cm)	400		1000		2000	
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)
		2	0,1215	2,123	0,1261	5,081	0,1307
4	0,1270	2,118	0,1326	5,076	0,1348	10,131	
6	0,1310	2,115	0,1341	5,073	0,1372	10,125	
8	0,1344	2,112	0,1369	5,070	0,1391	10,122	
10	0,1376	2,110	0,1394	5,068	0,1408	10,119	
12	0,1422	2,108	0,1418	5,065	0,1429	10,112	
14	0,1426	2,106	0,1440	5,062	0,1447	10,108	
16	0,1449	2,108	0,1459	5,060	0,1462	10,105	
18	0,1471	2,107	0,1477	5,059	0,1475	10,103	
S%		21	1	17	0	13	0

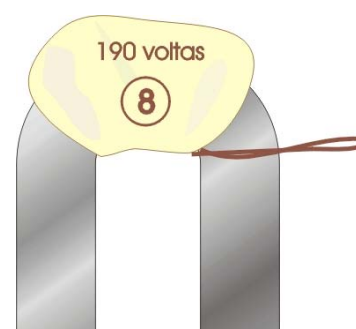


FIG. 93: Transdutor Magnético 08

Seu núcleo é construído em ferro-silício laminado e bobina localizada na região simétrica entre os entreferros. Apresenta áreas de contato planas e iguais.

Apresentou sensibilidade (17% em corrente a 1kHz) semelhante ao Transdutor Magnético 04, em tensões muito elevadas.

8.2.6. Transdutor Magnético 09

A TABELA 23 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 09.

TABELA 23: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 09

		400		1000		2000		
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	
Transdutor Magnético 09 - A	Distâncias	2	0,1303	0,604	0,1282	1,298	0,1327	2,539
		4	0,1340	0,596	0,1322	1,291	0,1359	2,528
		6	0,1374	0,592	0,1350	1,287	0,1380	2,523
		8	0,1398	0,586	0,1376	1,284	0,1397	2,519
		10	0,1415	0,582	0,1400	1,281	0,1414	2,516
		12	0,1435	0,577	0,1419	1,277	0,1430	2,511
		14	0,1452	0,574	0,1439	1,275	0,1446	2,506
		16	0,1465	0,570	0,1456	1,271	0,1460	2,502
		18	0,1474	0,568	0,1473	1,270	0,1472	2,500
			S%	c	6	15	2	11
Transdutor Magnético 09 - B	Distâncias	2	0,1199	1,955	0,1240	4,622	0,1290	9,216
		4	0,1260	1,949	0,1290	4,616	0,1335	9,203
		6	0,1301	1,946	0,1327	4,612	0,1362	9,196
		8	0,1340	1,943	0,1358	4,608	0,1383	9,190
		10	0,1375	1,940	0,1387	4,605	0,1403	9,186
		12	0,1403	1,937	0,1412	4,603	0,1425	9,180
		14	0,1430	1,935	0,1436	4,600	0,1446	9,175
		16	0,1453	1,933	0,1458	4,597	0,1462	9,170
		18	0,1475	1,932	0,1476	4,595	0,1476	9,167
			S%	23	1	19	1	14
Transdutor Magnético 09 - C	Distâncias	2	0,1172	4,184	0,1211	10,059	0,1242	20,038
		4	0,1236	4,180	0,1268	10,052	0,1299	20,010
		6	0,1284	4,177	0,1308	10,046	0,1330	20,003
		8	0,1326	4,175	0,1342	10,043	0,1354	19,997
		10	0,1363	4,172	0,1373	10,041	0,1376	19,992
		12	0,1396	4,169	0,1402	10,037	0,1403	19,983
		14	0,1424	4,167	0,1429	10,033	0,1427	19,975
		16	0,1450	4,165	0,1452	10,032	0,1446	19,970
		18	0,1474	4,163	0,1472	10,032	0,1459	19,966
			S%	26	1	22	0	18

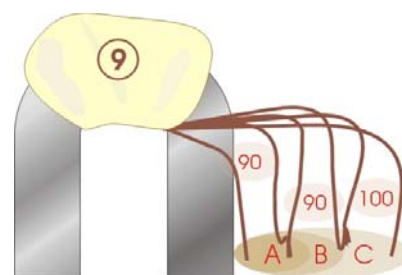


FIG. 94: Transdutor Magnético 09

Os valores 90, 90 e 100 fazem referência ao número de espiras contidos em cada seção do enrolamento.

Construído em ferro-silício laminado, com bobina na região simétrica em relação aos entreferos, apresenta áreas de contato planas e iguais. A sensibilidade em corrente aumenta com número de espiras (A – 15%, B – 19%, C – 22% a 1kHz) enquanto ocorre decrescimo de sensibilidade em tensões (A – 2%, B – 1%, C – 0% a 1kHz).

8.2.7. Transdutor Magnético 10

A TABELA 24 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 10.

TABELA 24: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 10

		400		1000		2000		
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	
Transdutor Magnético 10	Distâncias	2	0,1371	1,059	0,1356	2,428	0,1373	4,721
		4	0,1397	1,023	0,1384	2,356	0,1398	4,591
		6	0,1414	1,001	0,1403	2,306	0,1413	4,513
		8	0,1430	0,975	0,1418	2,267	0,1425	4,453
		10	0,1442	0,959	0,1433	2,232	0,1437	4,398
		12	0,1453	0,940	0,1445	2,203	0,1447	4,343
		14	0,1460	0,930	0,1456	2,178	0,1457	4,302
		16	0,1469	0,915	0,1465	2,156	0,1465	4,262
		18	0,1474	0,906	0,1472	2,138	0,1472	4,240
S%		8	17	9	14	7	11	

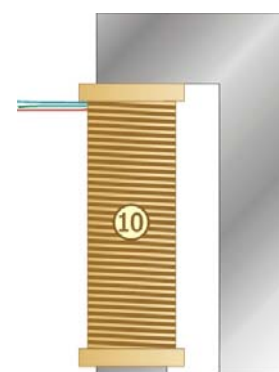


FIG. 95: Transdutor Magnético 10

Transdutor construído em ferro-silício laminado, possui uma bobina próxima a um dos entreferos, apresentando áreas de contato iguais.

Apresentou sensibilidade de 9% em corrente a 1kHz

8.2.8. Transdutor Magnético 11

A TABELA 25 apresenta valores de voltagem e corrente elétrica em função da frequência para o Transdutor Magnético 11.

TABELA 25: Voltagem e corrente para o Transdutor Magnético 11

		400		1000		2000		
		I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	I(A)	V(V)	
Transdutor Magnético 11	Distâncias	2	0,0920	97,250	0,0395	97,330	0,0203	101,180
		4	0,0980	97,180	0,0416	97,290	0,0214	101,110
		6	0,1025	97,110	0,0432	97,240	0,0222	101,070
		8	0,1059	97,080	0,0446	97,220	0,0227	101,040
		10	0,1092	97,030	0,0458	97,180	0,0232	101,010
		12	0,1120	97,000	0,0469	97,150	0,0237	100,980
		14	0,1144	96,970	0,0479	97,130	0,0242	100,960
		16	0,1166	96,950	0,0487	97,100	0,0245	100,930
		18	0,1182	96,920	0,0494	97,090	0,0247	100,890
		S%	28	0	25	0	22	0

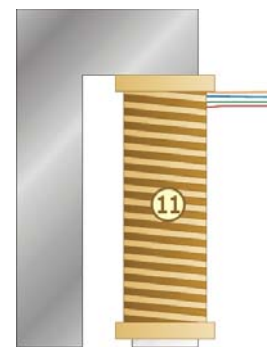


FIG. 96: Transdutor Magnético 11

Transdutor construído em ferro-silício laminado possui uma bobina próxima a um dos entreferros, apresentando áreas de contato planas e iguais.

Apresentou sensibilidade de 25% em corrente a 1kHz, superior a outros transdutores. Porém está fora do padrão 147,0 mA e seus valores de voltagem são elevados.

8.3. Apêndice 03: Tabelas e Resultados

8.3.1. Valores de Voltagem do Transdutor 03 no Tubo HP40

TABELA 26: Voltagem do Transdutor Magnético 03 no tubo HP40

Dados em Volts		Tubo Carbonetado em Serviço					
		Referência Longitudinal					
		Transdutor no Sentido Transversal					
		1	2	3	4	5	
Referência Circunferencial	0	12,184	12,194	12,213	12,146	12,109	Primeiro dia
	1	12,309	12,296	12,328	12,266	12,212	
	2	12,475	12,444	12,533	12,448	12,315	
	3	12,437	12,485	12,507	12,424	12,418	
	4	12,349	12,347	12,379	12,311	12,340	
	5	12,168	12,172	12,158	12,057	12,085	
	6	12,066	12,038	11,965	11,903	11,978	
	7	11,992	11,950	11,951	11,924	11,992	
	8	11,980	11,985	12,004	11,904	12,015	
	9	12,117	12,107	12,069	11,953	11,989	
	10	12,319	12,222	12,170	12,057	12,082	
	11	12,554	12,532	12,360	12,151	12,215	
	12	12,569	12,488	12,443	12,296	12,305	
	13	12,529	12,420	12,522	12,367	12,434	
	14	12,294	12,319	12,413	12,253	12,311	
	15	12,200	12,196	12,256	12,147	12,161	
	16	12,171	12,159	12,178	12,106	12,124	
	17	12,195	12,148	12,088	12,088	12,093	
	0	12,170	12,186	12,128	12,128	12,119	Quatro dias
	1	12,296	12,297	12,267	12,267	12,229	
	2	12,455	12,442	12,438	12,438	12,320	
	3	12,414	12,495	12,415	12,415	12,415	
	4	12,328	12,349	12,378	12,378	12,340	
	5	12,193	12,158	12,062	12,062	12,078	
	6	12,075	12,020	11,914	11,914	11,973	
	7	11,990	11,947	11,916	11,916	11,989	
	8	11,992	11,984	11,906	11,906	12,007	
	9	12,099	12,099	11,951	11,951	11,982	
	10	12,305	12,231	12,052	12,052	12,089	
	11	12,550	12,532	12,181	12,181	12,219	
	12	12,557	12,496	12,305	12,305	12,314	
	13	12,521	12,427	12,375	12,375	12,419	
	14	12,300	12,302	12,252	12,252	12,297	
	15	12,194	12,185	12,245	12,245	12,161	
	16	12,168	12,140	12,138	12,138	12,114	
	17	12,182	12,143	12,108	12,108	12,094	
	0	12,174	12,181	12,114	12,114	12,118	Dois Meses
	1	12,300	12,299	12,248	12,248	12,217	
	2	12,474	12,442	12,437	12,437	12,328	
	3	12,425	12,491	12,422	12,422	12,454	
	4	12,325	12,330	12,347	12,347	12,315	
	5	12,177	12,155	12,050	12,050	12,081	
	6	12,067	12,022	11,903	11,903	11,979	
	7	11,990	11,950	11,917	11,917	11,984	
	8	11,986	11,980	11,902	11,902	11,998	
	9	12,100	12,097	11,944	11,944	11,982	
	10	12,295	12,226	12,043	12,043	12,080	
	11	12,558	12,526	12,161	12,161	12,215	
	12	12,550	12,514	12,295	12,295	12,267	
	13	12,523	12,515	12,370	12,370	12,410	
	14	12,285	12,419	12,266	12,266	12,294	
15	12,192	12,261	12,147	12,147	12,152		
16	12,171	12,173	12,090	12,090	12,102		
17	12,185	12,156	12,090	12,090	12,087		
Variação Máxima		0,589	0,585	0,631	0,546	0,481	

8.3.2. Determinação do Número de Espiras do Indutor

Na FIG. 97a encontra-se o esquema representativo do método utilizado para determinar o número de espiras de cada seção da bobina. A partir de 10 espiras enroladas sobre as bobinas primária e secundária, determinou-se a relação voltagem/espira.

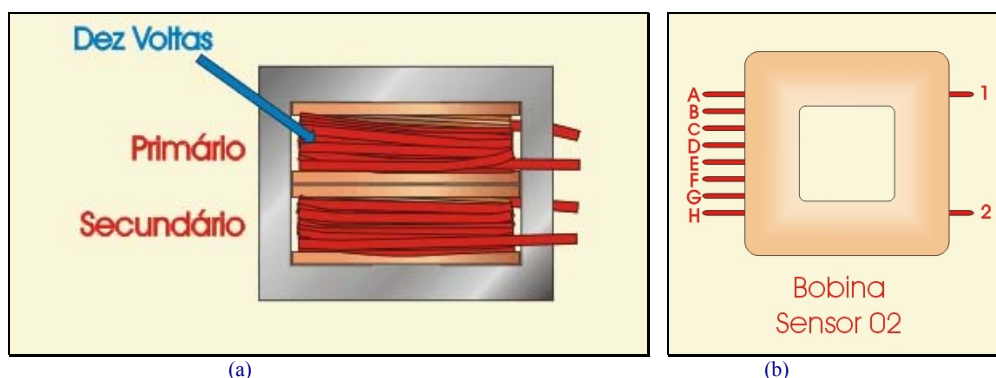


FIG. 97: Transformador com enrolamento de 10 espiras.

No enrolamento principal 1-2 apresentado na FIG. 97b, aplica-se uma diferença de potencial de 110 VAC. Os demais segmentos (A-B, A-C, A-D, A-E, A-F, A-G e A-H) passam a apresentar distintos valores de voltagem, gerados por indução magnética. Estes valores estão registrados na TABELA 27. O número de espiras de cada seção foi calculado através da relação tensão/espira no enrolamento de 10 espiras (TABELA 27).

TABELA 27: Número de espiras do Transdutor Magnético 02 obtido por indução externa.

Saídas	Voltagem (V)	Nº de Voltas
1-2	110,00	2949
A-B	2,10	56
A-C	2,78	75
A-D	3,46	93
A-E	4,14	111
A-F	4,82	129
A-G	5,50	147
A-H	7,18	192
1 voltagem	0,04	1
37,3 mV/espira		

A indutância foi calculada pela **Equação 26**, referente a montagem do circuito LR (indutor e resistor em série) da FIG. 98.

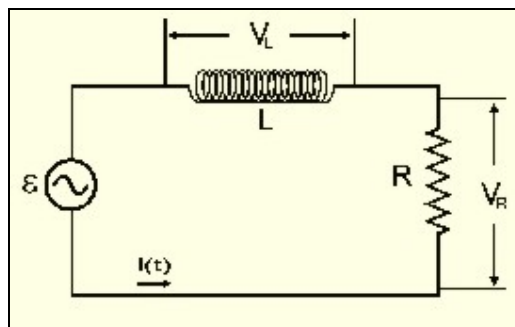


FIG. 98: Esquema eletrônico LR

$$L = \frac{V_L \cdot R}{2\pi \cdot f \cdot V_R}$$

Equação 26

onde:

L é a indutância da bobina,

V_L a voltagem no indutor,

R um resistor devidamente escolhido,

f a frequência de oscilação da voltagem e

V_R a voltagem no resistor,

Os dados (contidos na TABELA 28) permitem apenas uma análise qualitativa, uma vez que a construção do transdutor, modificará a configuração do núcleo de ferro-silício, modificando completamente a indutância do sistema.

A escolha por um transdutor de três entreferros deveu-se unicamente à facilidade de construção. Sabe-se de antemão que um sério problema de campo magnético disperso ocorrerá, resultando em perda de precisão.

Ao ser aberto o núcleo W/I do indutor altera-se a indutância do sistema. À aproximação de um elemento ferromagnético, a maior parte do fluxo magnético percorrerá o caminho de menor relutância. Desta forma, é possível criar um transdutor de proximidade,

servindo-se da variação de caminho percorrido pelas linhas de indução magnética. Esta alteração não afeta a frequência de operação mas somente a sensibilidade do transdutor.

TABELA 28: Valores de indutância de cada trecho do indutor do Transdutor Magnético 02

TRANSDUTOR 02	Resistência R = 99,6 Ω				Valor Médio
	Indutância nas Bobinas				
	Vr (V)	Vl (V)	Vt (V)	L (Henry)	
Prim. 1-2	0,164	4,584	4,595	1,0938E+00	1,1933E+00
	0,145	4,587	4,620	1,2439E+00	
	0,145	4,587	4,620	1,2423E+00	
Sec. AB	3,048	0,072	3,090	9,2585E-04	7,1619E-04
	3,050	0,048	3,084	6,1194E-04	
	3,050	0,048	3,084	6,1078E-04	
Sec. AC	3,056	0,044	3,090	5,6891E-04	8,4738E-04
	3,043	0,076	3,089	9,7824E-04	
	3,043	0,077	3,089	9,9499E-04	
Sec. AD	3,040	0,109	3,098	1,4029E-03	1,4745E-03
	3,034	0,117	3,092	1,5097E-03	
	3,034	0,117	3,093	1,5110E-03	
Sec. AE	3,032	0,155	3,103	2,0008E-03	
	3,025	0,165	3,098	2,1438E-03	
	3,026	0,165	3,097	2,1437E-03	
Sec. AF	3,023	0,206	3,108	2,6666E-03	2,8050E-03
	3,017	0,221	3,010	2,8742E-03	
	3,017	0,221	3,103	2,8742E-03	
Sec. AG	3,015	0,263	3,114	3,4184E-03	3,6080E-03
	3,007	0,284	3,109	3,7035E-03	
	3,007	0,284	3,109	3,7021E-03	

8.3.3. Voltagem e Corrente Para o T.M. 02 Sobre o Gabarito.

TABELA 29: Voltagem no Transdutor Magnético 02 sobre o gabarito

VOLTAGEM SECUNDÁRIO (V) X DISTÂNCIA(mm) X FREQUÊNCIA(Hz)											
Freq.	DISTÂNCIA SOBRE O GABARITO									Diferença de Tensão	
	20	40	60	80	100	120	140	160	180		
Transdutor 02- Primário com 0,566 V	80	4,4427	4,0380	3,8440	3,6897	3,5520	3,4530	3,3674	3,2945	3,2529	1,1898
	100	5,3832	4,9409	4,7032	4,4980	4,3460	4,2180	4,0980	4,0110	3,8570	1,5262
	200	8,7945	8,1793	7,8749	7,5930	7,3759	7,1997	7,0664	6,9437	6,8699	1,9246
	300	10,6550	10,0702	9,7840	9,5090	9,2824	9,1140	8,9537	8,8402	8,7498	1,9052
	400	11,5960	11,0333	10,7390	10,4841	10,2704	10,1077	9,9500	9,8342	9,7280	1,8680
	500	11,9640	11,4038	11,1085	10,8688	10,6630	10,4860	10,3237	10,2216	10,1233	1,8407
	1000	12,9300	12,4930	12,2310	12,0260	11,8620	11,7260	11,5970	11,4930	11,4340	1,4960
	1500	13,2080	12,7770	12,5250	12,3760	12,2220	12,0840	11,9660	11,8760	11,8100	1,3980
	2000	13,2950	12,9020	12,6870	12,5450	12,4080	12,2930	12,1880	12,1080	12,0560	1,2390
	2500	13,3770	12,9600	12,7500	12,5920	12,4770	12,3600	12,2590	12,1740	12,1480	1,2290
	3000	13,7914	13,3687	13,1717	13,0230	12,9048	12,7922	12,6905	12,6149	12,5670	1,2244
	3500	13,9299	13,5126	13,3126	13,1714	13,0569	12,9530	12,8650	12,7870	12,7670	1,1629
	4000	14,1520	13,7272	13,5429	13,4066	13,2859	13,1749	13,0799	13,0110	12,9760	1,1760

Observação: Por razão de flutuação do ponto de zero, adotou-se apenas 5 Algarismos significativos

TABELA 30: Corrente no Transdutor Magnético 02 sobre o gabarito

CORRENTE SECUNDÁRIO(A) X DISTÂNCIA(mm) X FREQUÊNCIA(Hz)											
Freq.	DISTÂNCIA SOBRE O GABARITO									Diferença de Corrente	
	20	40	60	80	100	120	140	160	180		
Transdutor 02 - Primário com 0,566 V	80	0.26054	0.26198	0.26358	0.26484	0.26532	0.26640	0.26649	0.26655	0.26790	7,36E-03
	100	0.25328	0.25704	0.25897	0.25967	0.26040	0.26084	0.26050	0.26140	0.25730	4,02E-03
	200	0.21161	0.21685	0.21968	0.22233	0.22479	0.22555	0.22712	0.22824	0.22935	1,77E-02
	300	0.17177	0.17760	0.18175	0.18449	0.18662	0.18893	0.19052	0.19193	0.19290	2,11E-02
	400	0.14424	0.15070	0.15455	0.15716	0.15943	0.16154	0.16304	0.16460	0.16530	2,11E-02
	500	0.11998	0.12530	0.12838	0.13085	0.13288	0.13443	0.13564	0.13694	0.13766	1,77E-02
	1000	0.06745	0.07114	0.07288	0.07429	0.07553	0.07657	0.07747	0.07822	0.07880	1,14E-02
	1500	0.04695	0.04928	0.05096	0.05147	0.05223	0.05291	0.05347	0.05395	0.05429	7,34E-03
	2000	0.03613	0.03871	0.03956	0.04033	0.04090	0.04140	0.04184	0.04220	0.04247	6,34E-03
	2500	0.02338	0.02414	0.02456	0.02488	0.02519	0.02543	0.02562	0.02520	0.02590	2,52E-03
	3000	0.02519	0.02628	0.02674	0.02662	0.02691	0.02767	0.02793	0.02813	0.02825	3,06E-03
	3500	0.02202	0.02290	0.02337	0.02363	0.02390	0.02411	0.02435	0.02454	0.02463	2,61E-03
	4000	0.01942	0.02016	0.02050	0.02007	0.02092	0.02111	0.02133	0.02142	0.02151	2,09E-03

8.3.4. Valores de Voltagem e Corrente para o T.M. 03 Sobre o Gabarito.

TABELA 31: Voltagem no Transdutor Magnético 03 sobre o gabarito

VOLTAGEM SECUNDÁRIO(V) X DISTÂNCIA(mm) X FREQUÊNCIA(Hz)										
Freq.	DISTÂNCIA SOBRE O GABARITO									Diferença de Corrente
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
80	5,2477	4,8035	4,5431	4,3330	4,1824	4,0273	3,8940	3,8141	3,7283	1,52
100	6,2468	5,8001	5,4999	5,2340	5,0803	4,9440	4,8032	4,6625	4,6064	1,64
200	10,1646	9,5452	9,1780	8,8944	8,6072	8,4161	8,2009	8,0430	7,9432	2,22
300	12,1858	11,6310	11,2582	10,9750	10,7466	10,5675	10,3520	10,2126	10,0597	2,13
400	13,1902	12,6065	12,2282	12,0000	11,7200	11,6055	11,4412	11,2830	11,1832	2,01
500	13,7720	13,3155	13,0378	12,7640	12,4700	12,3974	12,2108	12,0447	11,8726	1,90
1000	14,8874	14,4667	14,2931	14,0730	13,8772	13,7536	13,6180	13,4966	13,4106	1,48
1500	15,1400	14,7530	14,5599	14,3770	14,2340	14,1194	13,9930	13,8850	13,8022	1,34
2000	15,2940	14,9260	14,7179	14,5590	14,4160	14,3013	14,1681	14,0510	14,0350	1,26
2500	15,4750	15,0756	14,9068	14,7505	14,5870	14,4980	14,3675	14,2900	14,2600	1,22
3000	15,6207	15,2280	15,0770	14,9370	14,8050	14,6900	14,5533	14,4997	14,5054	1,12
3500	15,8143	15,4274	15,2739	15,1474	15,0530	14,8974	14,8300	14,7458	14,7440	1,07
4000	16,0500	15,6750	15,5170	15,4108	15,3007	15,1997	15,0999	15,0519	14,9940	1,06

TABELA 32: Corrente no Transdutor Magnético 03 sobre o gabarito

CORRENTE SECUNDÁRIO X DISTÂNCIA X FREQUÊNCIA										
Freq.	DISTÂNCIA SOBRE O GABARITO (cm)									de Corrente
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
80	0.33446	0.33853	0.33946	0.34025	0.34235	0.34244	0.34092	0.34371	0.34391	9.5E-03
100	0.31842	0.32794	0.32870	0.32921	0.33262	0.33500	0.33602	0.33549	0.33877	2.0E-02
200	0.26530	0.27315	0.27674	0.28134	0.28420	0.28776	0.28910	0.29127	0.29305	2.8E-02
300	0.21390	0.22330	0.22776	0.23274	0.23567	0.23980	0.24244	0.24544	0.24695	3.3E-02
400	0.17863	0.18720	0.19065	0.19632	0.20090	0.20276	0.20558	0.20778	0.21037	3.2E-02
500	0.15290	0.16200	0.16572	0.16880	0.16962	0.17582	0.17826	0.18022	0.18115	2.8E-02
1000	0.08708	0.09143	0.09370	0.09593	0.09781	0.09963	0.10113	0.10250	0.10366	1.7E-02
1500	0.06042	0.06306	0.06455	0.06592	0.06795	0.06807	0.06918	0.06994	0.07060	1.0E-02
2000	0.04712	0.04914	0.05035	0.05120	0.05194	0.05274	0.05342	0.05390	0.05466	7.5E-03
2500	0.03800	0.03956	0.04049	0.04108	0.04153	0.04220	0.04258	0.04320	0.04348	5.5E-03
3000	0.03200	0.03350	0.03410	0.03460	0.03486	0.03540	0.03567	0.03606	0.03642	4.4E-03
3500	0.02772	0.02904	0.02930	0.02983	0.03001	0.03024	0.03071	0.03088	0.03107	3.4E-03
4000	0.02414	0.02530	0.02580	0.02607	0.02625	0.02643	0.02678	0.02694	0.02704	2.9E-03

8.3.5. Valores de Corrente Para o T.M. 03 Modificado (Apenas com Primário) Sobre o Gabarito.

TABELA 33: Corrente do Transdutor Magnético 03 com apenas enrolamento primário

Freq.	CORRENTE(mA) X DISTÂNCIA(mm) X FREQUÊNCIA(Hz)									Diferença de Corrente
	20		60	80	100	120	140	160		
500	238.2	241.9	244.3	246.2	247.8	249.0	250.1	251.1	251.9	13.70
700	200.9	206.7	209.5	211.7	213.5	215.0	216.3	217.4	218.2	17.30
800	184.0	188.7	191.5	193.6	195.2	196.6	197.8	198.9	199.7	15.70
900	170.5	175.2	178.0	180.1	181.6	183.0	184.3	185.1	185.8	15.33
1000	161.5	165.6	168.6	170.8	172.5	173.9	175.1	176.2	177.0	15.50
1500	116.4	119.8	121.8	123.3	124.5	125.6	126.6	127.4	128.1	11.70
2000	88.5	91.2	92.6	93.6	94.6	95.4	96.1	96.7	97.1	8.60
3000	168.8	173.8	176.5	178.4	180.0	181.3	182.7	183.7	184.4	15.54
4000	130.2	133.8	135.6	136.7	137.7	138.6	139.6	140.2	140.9	10.64
5000	186.5	191.8	194.3	195.8	196.9	198.2	199.5	200.4	200.8	14.32
8000	176.4	181.2	183.3	184.4	185.3	186.1	186.7	187.2	187.6	11.16
10.000	182.8	187.5	189.6	190.6	191.4	192.1	192.7	193.1	193.4	10.57
15.000	123.6	126.6	127.8	128.3	128.7	128.9	129.3	129.5	129.7	6.11

8.3.6. Alteração da Faixa de Frequência de Maior Sensibilidade do T.M.03

A faixa de frequência de maior sensibilidade do Transdutor Magnético 03 mudou para região entre 1 kHz e 2kHz. Esta análise só foi possível pela equiparação dos valores iniciais de corrente. A partir da TABELA 33, construiu-se a TABELA 34, adotando o valor inicial de corrente 238,2 mA (500 Hz na posição 20 mm) como referência. A partir daí, todos demais valores foram majorados segundo a expressão do quadro da FIG. 99.

	A	B	C
1	238,2		
2			$A1+((A1/A2(C2-A2))$
3			

FIG. 99: Exemplo de aplicação para majorar o valor da célula C2

Um exemplo torna mais clara a explicação:

Tomando-se a coluna 80 e linha 900 da TABELA 33, encontramos o valor 180,1
Aplicado a fórmula calcula-se:

$$238,2 + \left(\frac{238,2}{170,5} (180,1 - 170,5) \right) = 251,5$$

TABELA 34: Corrente (modificada) no Transdutor Magnético 03 com apenas enrolamento primário

CORRENTE(mA) X DISTÂNCIA(mm) X FREQUÊNCIA(Hz)										
Freq.	DISTÂNCIA SOBRE O GABARITO									Diferença de Corrente
	20	40	60	80	100	120	140	160	180	
500	238,2	241,9	244,3	246,2	247,8	249,0	250,1	251,1	251,9	13,70
700	238,2	245,1	248,4	251,0	253,1	254,9	256,5	257,8	258,7	20,51
800	238,2	244,3	247,9	250,6	252,7	254,5	256,1	257,5	258,5	20,32
	238,2	244,8	248,7	251,5	253,7	255,7	257,5	258,6	259,6	21,42
1000	238,2	244,2	248,7	251,9	254,4	256,5	258,2	259,9	261,1	22,86
1500	238,2	245,2	249,3	252,3	254,8	257,0	259,1	260,7	262,1	23,94
2000	238,2	245,4	249,2	251,9	254,6	256,8	258,7	260,3	261,3	23,15
3000	238,2	245,2	249,1	251,7	253,9	255,9	257,7	259,2	260,1	21,93
	238,2	244,7	247,9	250,1	251,8	253,5	255,2	256,4	257,7	19,46
5000	238,2	245,0	248,2	250,1	251,5	253,1	254,7	255,9	256,5	18,29
8000	238,2	244,6	247,4	249,0	250,2	251,2	252,1	252,8	253,3	15,07
10.000	238,2	244,3	247,0	248,4	249,4	250,3	251,0	251,7	252,0	13,77
15.000	238,2	244,0	246,4	247,4	248,1	248,6	249,2	249,7	250,0	11,78
	1,8	2,6	3,4	4,2	5,0	5,8		7,4	8,2	
Espessura de entreferro (mm)										

8.3.7. Valores de Voltagem Baixa e Alta Sensibilidade no T.M. 13.

TABELA 35: Voltagem (mV) no conversor de sinais no Transdutor Magnético 13 com alta sensibilidade

T.M. 13 – Alta Sensibilidade					
	1	2	3	4	5
0	190	197	208	264	380
1	365	257	295	368	507
2	480	420	547	689	619
3	392	438	531	586	753
4	344	379	404	490	611
5	289	246	225	255	370
6	161	109	65	111	285
7	74	48	41	113	266
8	50	64	73	95	248
9	188	178	108	125	282
10	373	269	253	290	417
11	484	565	404	400	529
12	540	502	446	448	550
13	491	423	577	529	725
14	335	319	396	431	517
15	232	225	266	273	434
16	188	186	179	239	393
17	199	177	190	244	374

TABELA 36: Voltagem (mV) no conversor de sinais no Transdutor Magnético 13 com baixa sensibilidade

T.M. 13 – Baixa Sensibilidade					
	1	2	3	4	5
0	106	114	123	155	224
1	228	163	176	225	298
2	292	270	365	444	380
3	245	288	328	352	450
4	221	232	246	289	353
5	172	146	139	137	221
6	95	62	26	63	174
7	38	20	9	55	155
8	19	27	32	42	145
9	109	100	65	71	161
10	223	172	150	183	241
11	300	339	247	248	297
12	347	306	255	278	334
13	313	267	347	341	433
14	214	193	239	256	323
15	144	133	154	171	263
16	114	103	104	143	231
17	109	96	101	140	227

8.4. Apêndice 04:

Materiais Magnéticos¹⁷

8.4.1. Magnetismo

Um simples exemplo de magnetismo, fenômeno físico associado com a atração de certos materiais, é mostrado na FIG. 100.

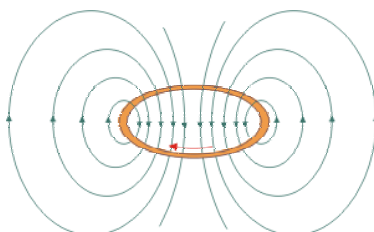


FIG. 100: Linhas de campo magnético geradas ao redor de uma espira circular

Uma corrente elétrica circular gera em suas vizinhanças uma região de atração física, ou *campo magnético*, representado por um conjunto de *linhas de fluxo magnético*. A magnitude e a direção do campo magnético em um dado ponto próximo à corrente circular é H , um vetor quantidade. Alguns materiais são intrinsecamente magnéticos, isto é, eles podem gerar um campo magnético sem uma corrente elétrica macroscópica. O ímã em barra, mostrada na FIG. 101, exibe um dipolo natural (norte – sul).

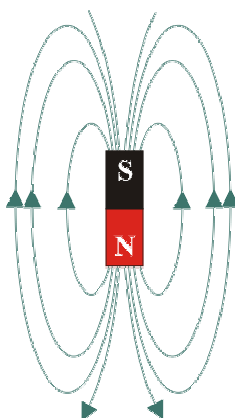


FIG. 101: Dipolo Natural

A mais importante utilidade do magnetismo é, obviamente, sua força de atração. A paridade entre dipolos é uma mostra da interação das órbitas dos elétrons que ocorre em escala atômica no material.

¹⁷ James F. Shackelford, Introduction to Materials Science for Engineers, Prentice Hall -Fifth Edition

Para o espaço livre ao redor da fonte de campo magnético, pode-se definir uma indução magnética B , cuja magnitude é uma densidade de fluxo. A indução está relacionada com o campo de força magnética, H , pela relação:

$$B = \mu_0 H$$

Equação 27

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo. Se um sólido é inserido no campo magnético, a magnitude da indução deverá mudar mas ainda será expressa de forma semelhante à relação anterior:

$$B = \mu H$$

Equação 28

onde μ é a permeabilidade magnética do sólido. É importante lembrar que esta equação básica para magnetismo é análoga à mais comum expressão do comportamento eletrônico, a lei de Ohm. Tomando-se sua expressão geral

$$V = I.R$$

Equação 29

e a combinarmos com a definição da resistividade e condutividade

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}$$

Equação 30

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Equação 31

obtem-se uma equação alternativa para a lei de Ohm:

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{l}$$

Equação 32

Nesta expressão $\frac{I}{A}$ é densidade de corrente e $\frac{V}{l}$ o gradiente de voltagem. Observa-se então que a indução magnética B é análogo da densidade de corrente e o campo de força magnética H é análogo ao gradiente de voltagem (campo de força elétrico), com permeabilidade magnética μ correspondendo a condutividade σ . A presença do sólido muda a indução. A contribuição prestada pelo sólido é ilustrada pela expressão

$$B = \mu H = \mu_0 (H + M)$$

Equação 33

onde M é chamado de magnetização do sólido e o termo $\mu_0 M$ representa o campo de indução magnética extra associado ao sólido. A magnetização M é a densidade volumétrica de momentos de dipolos magnéticos associados com a estrutura eletrônica do sólido.

A unidade para estes termos são webers/m² para B (a magnitude de B), webers/ampère.metro ou henry/m para μ e ampère/m para H e M . A magnitude de $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. As vezes é conveniente descrever o comportamento magnético de um sólido em termos de sua permeabilidade relativa, μ_R , dada por

$$\mu_R = \frac{\mu}{\mu_0} \quad \text{Equação 34}$$

o qual, obviamente, é adimensional.

A susceptibilidade magnética χ , razão entre a magnetização e o campo aplicado, nos permite saber qual a amplificação produzida pelo material.

$$\chi = \frac{M}{H} \quad \text{Equação 35}$$

A relação entre a permeabilidade relativa e a susceptibilidade é dada por:

$$\mu_R = 1 + \chi \quad \text{Equação 36}$$

Alguns sólidos, tais como cobre e ouro, de alta condutividade, apresentam permeabilidade ligeiramente menor que 1 (aproximadamente 0,99995 para ser exato). Tais materiais exibem diamagnetismo. Com efeito, a estrutura eletrônica do material responde a aplicação de um campo magnético com um campo levemente oposto. Uma grande quantidade de sólidos tem permeabilidade ligeiramente maior que 1 (entre 1,00 e 1,01). Tais materiais apresentam paramagnetismo. Suas estruturas eletrônicas lhes permitem criar um campo paralelo ao aplicado. O efeito magnético para ambos, materiais diamagnéticos e paramagnéticos é pequeno. A FIG. 102 apresenta o gráfico B-H para estas duas categorias de materiais. Nas propriedades magnéticas o gráfico B-H é equivalente ao gráfico σ - ϵ para o comportamento mecânico.

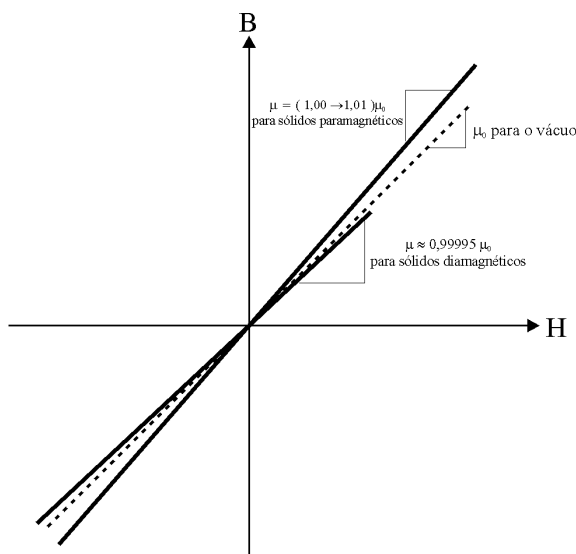


FIG. 102: Comparação entre diamagnetismo e paramagnetismo gráfico de indução B versus campo de força magnética H

8.4.2. Ferromagnetismo

Para muitos materiais, a indução aumenta drasticamente com a intensidade do campo. A FIG. 103 ilustra este fenômeno (conhecido como ferromagnetismo).

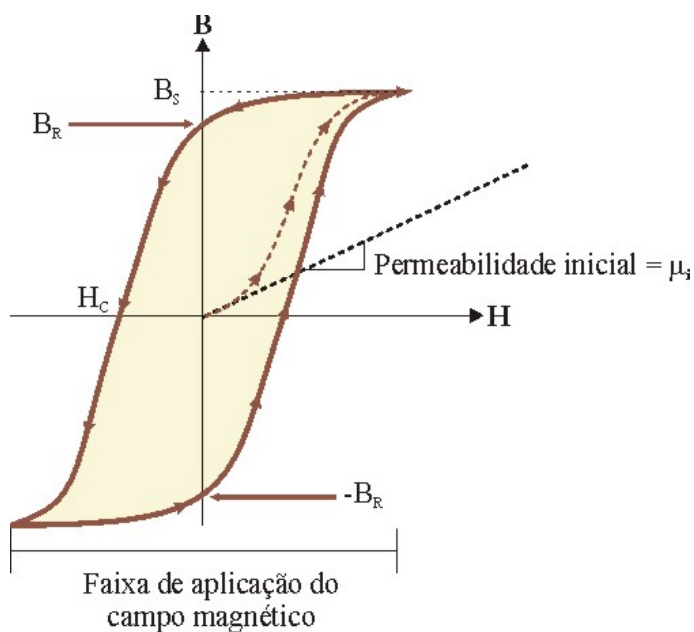


FIG. 103: Um grande aumento ocorre em B durante a magnetização inicial (linha pontilhada). A indução encontra a saturação (B_S) uma vez aplicado campo suficiente. Muito daquele campo é retido quando se remove o campo (B_R = indução remanescente). Um campo coercitivo (H_C) é requerido para reduzir a indução a zero.

É um forte contraste com o comportamento linear da FIG. 102. As setas na FIG. 103 permite seguir a indução B , como uma função do forte campo magnético H . Inicialmente, a amostra estudada estava desmagnetizada, com $B = 0$, na ausência de um campo ($H = 0$). A aplicação de um campo gera um leve aumento na indução comparável com aquela do material paramagnético. No entanto, após um pequeno aumento no campo, um forte aumento de indução ocorre. Com os aumentos seguintes no campo, os níveis de indução atingem um nível máximo, chamado indução de saturação, B_s ¹⁸. Seguindo a curva B - H de remoção do campo (setas para a esquerda), a indução não vai a zero (indução remanescente B_R) para um campo $H = 0$. Para remover esta indução remanescente, o campo deve ser revertido. Fazendo-se isto, B se reduzirá a zero para um campo coercitivo H_C (algumas vezes chamado de campo coercitivo). Continuando a aumentar a magnitude do campo reverso, o material poderá ser novamente saturado (em uma saturação $-B_s$). Como ocorrido anteriormente, a indução remanescente ($-B_R$) permanece quando o campo de força se reduz a zero. A linha tracejada da FIG. 103 representa a magnetização inicial, e a linha cheia o caminho completamente reversível, contanto que o campo continue a oscilar entre os extremos indicados. A linha contínua é conhecida como curva de histerese.

Em algumas circunstâncias é interessante usar o termo retentividade, representando a indução remanescente no material quando a “força magnetizadora H ” tenha sido reduzida a zero (B_R). Também se utiliza o termo “força coersitiva” à força magnética que se deve ser aplicada para reduzir a densidade de fluxo magnético a zero (H_C).

Para entendermos esta curva de histerese, devemos explorar as estrutura microscópica e macroscópica deste material. Um modelo primitivo de contribuição magnética é o enumerado logo no início, onde o movimento orbital de carga elétrica produz um campo magnético. Mais importante ainda para a nossa discussão é a contribuição da rotação do elétron. Na realidade, spins eletrônicos são efeitos relativísticos associados a momento angular intrínseco do elétron. Neste caso, a magnitude do dipolo magnético ou momento magnético devido ao spin eletrônico é o magneton de Bohr, $\mu_B (= 9,27 \times 10^{-24} \text{ ampère.m}^2)$. Pode ser positivo (para um spin para cima) ou negativo (para spin para baixo). A orientação do spin é, obviamente, convencional mas é importante em termos de contribuição

¹⁸ A magnetização M , introduzida na Erro! A origem da referência não foi encontrada. é, de fato, a quantidade que saturou. Uma inspeção mais detalhada desta equação indica que \mathbf{B} , que inclui a contribuição de $\mu_0\mathbf{H}$, continua crescendo com o acréscimo de \mathbf{H} ($\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H} + \mu_0\mathbf{M} \approx \mu_0\mathbf{M}$). Desde que a magnitude de \mathbf{B} seja muito maior que $\mu_0\mathbf{H}$ no ponto de saturação, \mathbf{B} parece constante e o termo “indução de saturação” é largamente utilizada. De fato, a indução verdadeiramente nunca satura.

magnética da associação eletrônica. Em uma camada eletrônica, os elétrons estão todos emparelhados com spins opostos e o momento magnético líquido é nulo. ($+\mu_B - \mu_B = 0$). A configuração eletrônica dos átomos nos mostra padrões regulares de acréscimo de elétrons até o argônio. O padrão de preenchimento de elétrons muda, no entanto, para números atômicos superiores a 18. Elétrons são acrescentados primeiramente no orbital 4s para os elementos 19 (potássio) e 20 (cálcio). As posteriores adições ocorrem com preenchimento do orbital 3d. Tendo-se um orbital interno incompleto, cria-se a possibilidade de surgirem elétrons desemparelhados. Isto é precisamente o caso para os elementos 21 (escândio) ao 28 (níquel). Cada par desemparelhado contribui com um simples magneton de Bohr para a natureza magnética do metal. O número de magnetons por elemento é dado na FIG. 104.

Número Atômico	Elemento	Estrutura Eletrônica 3d	Momento (μ_B)
21	Sc		1
22	Ti		2
23	V		3
24	Cr		5
25	Mn		5
26	Fe		4
27	Co		3
28	Ni		2
29	Cu		0

↑ = orientação eletrônica do spin

FIG. 104: Estrutura eletrônica dos orbitais 3d para metais de transição. Elétrons desemparelhados contribuem para a natureza magnética destes metais

Pode-se verificar que o ferro (elemento 26) é um metal de transição e tem quatro elétrons 3d desemparelhados, e conseqüentemente $4 \mu_B$. Portanto é justificado que ferromagnetismo faça referência direta ao ferro. Porém podemos identificar muitos outros elementos com o mesmo comportamento.

Podemos agora, verificar porque metais de transição têm altos valores de indução. Se átomos adjacentes na estrutura do cristal tem seus momentos magnéticos alinhados, o resultado total será um acentuado momento magnético (FIG. 105).

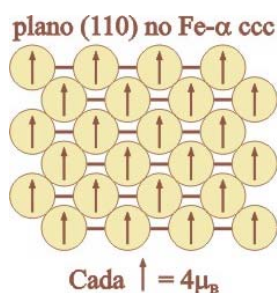


FIG. 105: O alinhamento dos domínios magnéticos para átomos adjacentes conduz a um grande momento magnético efetivo., como no caso do ferro ccc à temperatura ambiente

A tendência de átomos adjacentes terem os momentos dipolares alinhados é consequência da interação de troca entre elétrons de spins adjacentes em átomos adjacentes. Isto é um simples caso de estabilidade de configuração eletrônica no sistema como um todo. Este caso é análogo ao compartilhamento de elétrons, base para as ligações covalentes. A interação de troca é função da cristalografia. No ferro- α (ccc), o grau de interação (e a indução de saturação resultante) varia com a direção cristalográfica. Mais interessante ainda é o ferro γ (fcc), que apresenta características paramagnética. Isto permite que ligas de aço inox austenítico sejam utilizadas em projetos onde se requerem materiais não magnéticos.

A FIG. 105 explica como é possível um alto valor de indução (B_S), mas também levanta uma nova questão: como a indução magnética pode ser nula? A resposta para esta questão é a explicado pela forma da curva de histerese ferromagnética proveniente da microestrutura.

O caso de um cristal de ferro não magnético com $B = 0$ é mostrado na FIG. 106. A microestrutura é composta de domínios, o qual se assemelha a um grão policristalino. No entanto, esta ilustração representa um simples cristal. Todos os domínios têm orientação cristalográfica comum. Domínios adjacentes diferem não na orientação cristalográfica mas na orientação dos momentos magnéticos. Por terem volumes iguais e momentos dipolares opostos, o efeito líquido de indução é zero. O drástico aumento de indução no início da magnetização é devido a grande porção de momentos atômicos individuais orientados em direção paralela à direção do campo aplicado. Com efeito, domínios favoravelmente orientados com o campo aplicado “crescem” as custas daquela direção desfavorável. Podemos notar a facilidade com que este crescimento ocorre observando a estrutura magnética entre domínios adjacentes.

A parede do bloco, mostrada na FIG. 106 é uma estreita região na qual a orientação dos momentos atômicos mudam gradativamente em 180° .

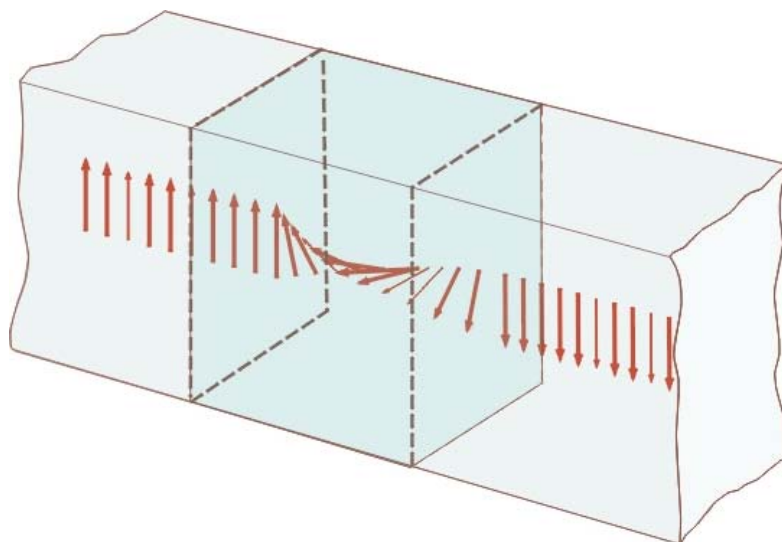


FIG. 106: No domínio, ou bloco, a parede é uma estreita região no qual o momento atômico muda de orientação em 180° . O movimento da parede envolve somente a mudança de orientação da região. Nenhuma migração de átomos é requerida.

Durante o crescimento do domínio, a parede muda de orientação para colocar o domínio mais próximo da orientação do campo aplicado. A FIG. 107 acompanha a microestrutura dos domínios durante o curso da curva de histerese ferromagnética.

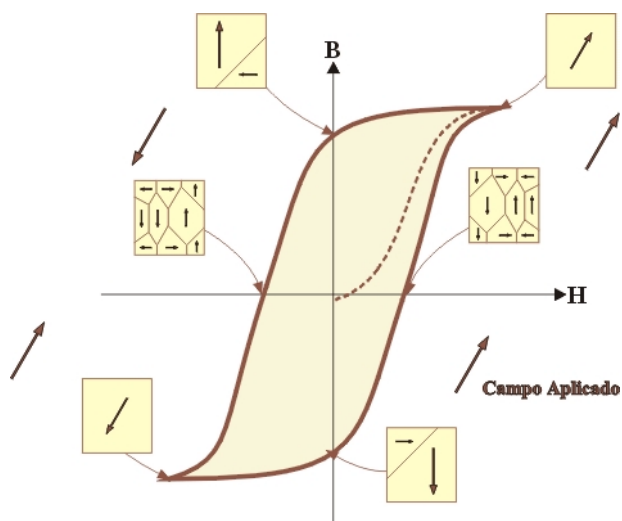


FIG. 107: Representação da microestrutura dos domínios no percurso da curva de histerese ferromagnética

8.5. Apêndice 03:

Conceitos de Eletromecânica

8.5.1. Fluxo Magnético¹⁹

Como definido de forma qualitativa no Item 2.2.1, o conjunto de todas as linhas do campo magnético que emerge do pólo norte do imã é chamado *fluxo magnético*. A unidade de fluxo magnético no S.I. é o weber (Wb). Um weber é igual a 1×10^8 linhas de campo magnético. Costuma-se usar com mais frequência o microweber (μWb)

8.5.2. Densidade de Fluxo Magnético

A densidade de fluxo magnético é o fluxo magnético por unidade de área de uma secção perpendicular ao sentido do fluxo.

$$\mathbf{B} = \frac{\phi}{A}$$

B = densidade de fluxo magnético em tesla (T)

ϕ = fluxo magnético (Wb)

A = Área em metros quadrados (m^2)

Equação 37

8.5.3. Permeabilidade Magnética

A permeabilidade magnética, já definido no item 2.2.1, refere-se à capacidade do material magnético concentrar o fluxo magnético (μ). A permeabilidade magnética de um material é dada pela razão entre a densidade de fluxo magnético B e a intensidade do campo magnético H .

$$\mu = \frac{B}{H}$$

B = densidade de fluxo magnético em teslas (T)

H = intensidade do campo magnético (Ae/m)

Equação 38

¹⁹ Extraído de Ralf J. Smith; Circuitos, Dispositivos e Sistemas. Livros Técnicos e Científicos S.A., Rio de Janeiro, 1975.

8.5.4. Força Magnetomotriz

A intensidade de um campo magnético numa bobina de fio depende da intensidade da corrente que flui nas espiras da bobina. Além disso, quanto mais espiras, mais concentradas as linhas de campo. O produto corrente elétrica e o número de espiras de uma bobina (expresso em ampère-espira - Ae), é conhecido como *força magnetomotriz*. (f.m.m.).

F = força magnetomotriz (Ae)

$$F = N.I$$

N = número de espiras

Equação 39

I = corrente elétrica (A)

8.5.5. Intensidade de Campo Magnético

Se uma bobina, com um certo número de ampère-espira for esticada até atingir o dobro de seu comprimento original, a intensidade do campo magnético, isto é, a concentração das linhas de campo, terá a metade do seu valor original.

A intensidade do campo depende, portanto do comprimento da bobina.

H = intensidade do campo magnético (Ae/m)

$$H = \frac{N.I}{l}$$

$N.I$ = força magnetomotriz (Ae)

Equação 40

l = distância entre os polos da bobina (m)

Esta equação se aplica a um solenóide H é a intensidade de campo magnético no centro de um núcleo de ar. Com um núcleo de ferro, H é a intensidade através do núcleo todo e l é o comprimento ou distância entre os polos do núcleo de ferro.

8.5.6. Circuitos Magnéticos

Um circuito magnético pode ser comparado a um circuito elétrico no qual uma f.e.m. produz uma corrente. Os ampères-espira NI da força magnetomotriz produzem o fluxo magnético. Portanto, a f.m.m. se comporta como a f.e.m. ou a voltagem, e o fluxo ϕ é comparado à corrente. A oposição que o material oferece à produção do fluxo é chamada *relutância*, que corresponde a resistência elétrica.

8.5.7. Relutância

A relutância é inversamente proporcional à permeabilidade. Quanto menor o entreferro, mais forte será o campo nessa região. Como o ar não é magnético, e assim é incapaz de concentrar linhas magnéticas. A relutância pode ser expressa na forma:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu \cdot A}$$

\mathfrak{R} = relutância (Ae/Wb)
 l = comprimento da bobina (m)
 μ = permeabilidade magnética do material (Tm/Ae)
 A = área da secção reta da bobina (m²)

Equação 41

8.5.8. Lei de Ohm Para os Circuitos Magnéticos

A lei de Ohm para os circuitos magnéticos, correspondente a $I = V/R$, é:

$$\phi = \frac{f.m.m.}{\mathfrak{R}}$$

ϕ = fluxo magnético (Wb)
 f.m.m. = força magnetomotriz (Ae)
 \mathfrak{R} = relutância (Ae/Wb)

Equação 42

8.5.9. Lei de Faraday da Tensão (Voltagem) Induzida

O valor da voltagem induzida depende do número de espiras da bobina e da velocidade com que o condutor intercepta as linhas de campo ou fluxo. Tanto o condutor quanto o fluxo podem se deslocar. A equação para se calcular o valor da voltagem induzida é:

$$V_{ind} = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

V_{ind} = voltagem induzida (V)
 N = número de espiras da bobina
 $\Delta\phi/\Delta t$ = velocidade com que o fluxo intercepta o condutor (Wb/s)

Equação 43

8.5.10. Indução Eletromagnética

As características da indução eletromagnética podem ser resumidas em três tópicos: (a) quando as linhas de força são interceptadas por um condutor ou as linhas de força interceptam um condutor, é induzida uma f.e.m., ou uma voltagem no condutor; (b) é preciso haver um movimento relativo entre o condutor e as linhas de força a fim de se induzir a f.e.m; (c) Mudando-se o sentido da interseção, mudar-se-á o sentido da f.e.m. induzida.

8.5.11. Perdas no Núcleo da Bobina

As perdas no núcleo magnético se devem às perdas por efeito de correntes parasitas e perdas por histerese. As correntes parasitas seguem uma trajetória circular dentro do próprio material do núcleo e se dissipam na forma de calor pelo núcleo. Esta perda é igual a $R.I^2$, onde R é a resistência elétrica da trajetória percorrida pela corrente através do núcleo. Quanto mais alta a frequência da corrente alternada na indutância, maiores as correntes parasitas e maiores as perdas por efeito Joule.

As perdas por histerese decorrem da potência adicional necessária para inverter o campo magnético nos materiais magnéticos com corrente alternada. As perdas por histerese geralmente são menores que as perdas produzidas por correntes parasitas. As bobinas com núcleo de ar praticamente não apresentam perdas por correntes parasitas ou por histerese.

8.5.12. Força Magnética na Bobina

A força magnética gerada em uma bobina é diretamente proporcional a intensidade de corrente elétrica que a circula como indica a Equação 44

$$F_M = 2\pi . B . r . n_e . i \quad \text{ou ainda} \quad \boxed{F = k . i} \quad \text{Equação 44}$$

onde F_M é a força magnética,

B o módulo do vetor indução magnética;

r raio da bobina, n_e número de espiras da bobina e

i a intensidade da corrente elétrica.

Esta relação torna-se importante quando se deseja utilizar bobinas de alto-falante como transdutor de força. A linearidade numa curva de transdução torna constante a sensibilidade em toda a curva de calibração, evitando definir faixas de validade da sensibilidade, facilitando posteriormente a aferição do transdutor. Caso esta força magnética possa transcrever a quantidade de material cementado, poderá ser empregada na construção destes transdutores.

8.6. Apêndice 06:

Circuito LR em Série²⁰

8.6.1. Análise Simples

Considere-se, inicialmente, um circuito que contém uma fonte f.e.m. $V(t)$, um resistor R e um indutor L (FIG. 108).

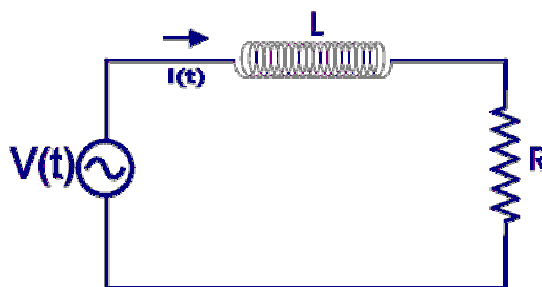


FIG. 108: Esquema de um Circuito LR

A corrente que percorre o circuito é dada por

$$i = i_0 \text{ sen } \omega t$$

Equação 45

e a voltagem por

$$V(t) = V_0 \cdot \text{sen } (\omega t + \delta)$$

Equação 46

Substituindo-se na equação diferencial do sistema

$$V(t) = L \frac{di}{dt} + Ri$$

Equação 47

resulta que

$$V(t) = i_0 (R \text{ sen } \omega t + L\omega \text{ cos } \omega t).$$

Equação 48

Expressando R e ωL como

$$R \equiv Z \text{ cos } \delta \quad \text{e} \quad \omega L \equiv Z \text{ sen } \delta$$

reescreve-se a Equação 48 como:

$$V(t) = i_0 (Z \text{ cos } \delta \text{ sen } \omega t + Z \text{ sen } \delta \text{ cos } \omega t) \quad \text{ou ainda,}$$

²⁰ Martins, Nelson; Introdução à Teoria da Eletricidade e do Magnetismo. Edgard Blücher, 1975 - 2ª edição

$$V(t) = i_0 Z \text{ sen}(\omega t + \delta)$$

Equação 49

Relacionando a f.e.m. e a corrente pode-se dizer que

$$V_0 = i_0 \cdot Z$$

$$V(t)_{ef} = i_{ef} Z$$

Equação 50

Comparando-se a Equação 50 à lei de Ohm, $V(t) = Ri(t)$, poder-se-ia aplicá-la aos circuitos RL, caso R seja substituído por Z. A quantidade Z é chamada Impedância do circuito.

Pelas definições apresentadas, pode-se afirmar que a força eletromotriz está avançada em relação à corrente um ângulo de fase δ .

A FIG. 109 relaciona estas as grandezas (resistência R, impedância Z, ângulo de fase δ e ωL) pela equação:

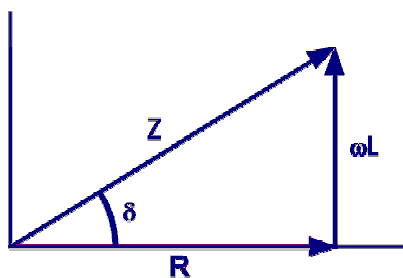


FIG. 109: Relação entre impedância, reatância e ângulo de fase do circuito

$$R^2 + (\omega L)^2 = Z^2,$$

ou ainda

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Equação 51

Tornando $\omega L = X_L$, onde X_L é chamada Reatância Indutiva, pode-se escrever:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Equação 52

com ângulo de fase expresso por:

$$\delta = \text{arctg}\left(\frac{X_L}{R}\right)$$

Equação 53

A impedância representa a oposição total, tanto resistiva quanto indutiva, à passagem da corrente alternada. Para a obtenção da impedância, aplica-se a soma vetorial sobre as componentes.

A FIG. 110 apresenta em um gráfico simultaneamente, de

$$I = i_0 \text{sen } \omega t \text{ (intensidade de corrente),}$$

$$V(t)_R = i_0 R \text{.sen } \omega t \text{ (queda de potencial no elemento resistivo)}$$

$$V(t)_L = i_0 L \omega \text{cos } \omega t \text{ (queda de potencial no indutor)}$$

$$V(t)_L = i_0 L \omega \text{sen } (\omega t + \pi/2)$$

$$V(t)_L = i_0 X_L \text{sen } (\omega t + \pi/2)$$

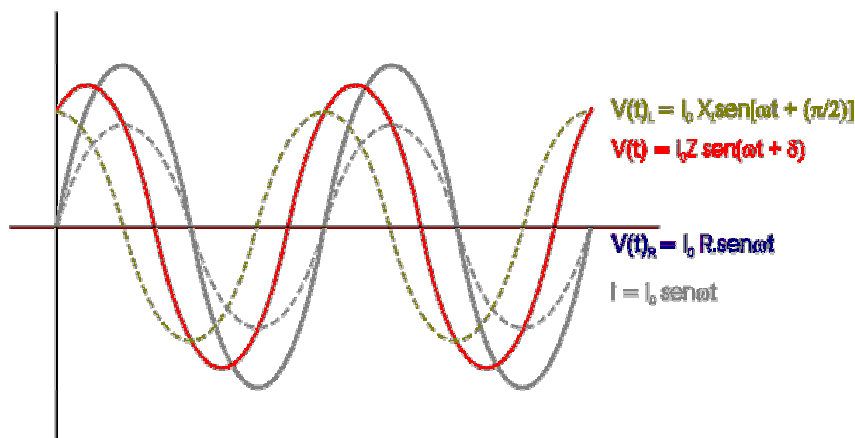


FIG. 110: Representação gráfica da corrente, voltagem total, voltagem no resistor e no indutor

Pode-se calcular a f.e.m. total $V(t)_T = V(t)_R + V(t)_L$ a partir de:

$$V(t) = i_0 R \text{sen } \omega t + i_0 X_L \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$V(t) = i_0 Z \left[\text{cos } \delta \text{sen } \omega t + \text{sen } \delta \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right]$$

$$V(t) = i_0 Z [\text{cos } \delta \text{sen } \omega t + \text{sen } \delta \text{cos } \omega t]$$

Equação 54

$$V(t) = i_0 Z \text{sen}(\omega t + \delta)$$

Observa-se que a Equação 54 já fora obtida anteriormente, através da Equação 49.

A f.e.m. total $V(t)$ e a voltagem no indutor $V(t)_L$ encontram-se avançadas um ângulo de fase δ em relação a corrente enquanto a voltagem no resistor $V(t)_R$ em fase com a corrente. o ângulo δ e tal que

$$0^\circ < \delta < 90^\circ$$

Com a Equação 53 é fácil a verificar que:

$$R \rightarrow 0 \quad \delta \rightarrow \pi/2 \quad \text{circuito apenas indutivo}$$

$$L \rightarrow 0 \quad \delta \rightarrow 0 \quad \text{circuito apenas resistivo}$$

Para a utilização usual é conveniente expressar a corrente e a voltagem em termos de valores eficazes. Através da queda de voltagem no resistor, obtém-se:

$$V(t)_R = iR \text{sen} \omega t$$

$$V(t)_{\text{Ref}} = \frac{i_0 \cdot R}{\sqrt{2}}$$

Equação 55

Por outro lado, a queda de potencial através de L é:

$$V(t)_L = i_0 X_L \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Logo, seu valor eficaz será:

$$V(t)_{\text{Lef}} = \frac{i_0 X_L}{\sqrt{2}}$$

Equação 56

Por fim, a diferença de potencial total ao longo do circuito é dada por:

$$V(t)_T = i_0 Z \text{sen}(\omega t + \delta)$$

e seu valor eficaz é

$$V(t)_{\text{ef}} = \frac{i_0 Z}{\sqrt{2}}$$

Equação 57

8.6.2. Método Mais Rigoroso²¹

Considerando-se o circuito da FIG. 111, regido pela equação diferencial

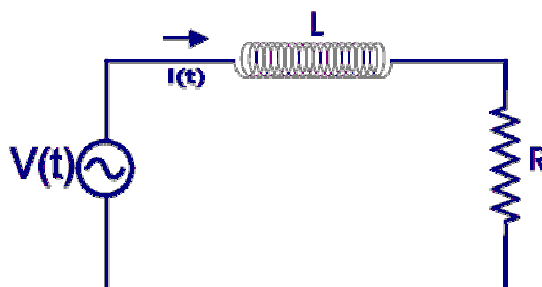


FIG. 111: Esquema de circuito LR

$$V(t) = L \frac{\partial i}{\partial t} + R.i \quad \text{Equação 47}$$

Aplica-se uma f.e.m. da forma

$$V(t) = V_0 \cdot \text{sen} \omega t$$

Como nosso o oscilador imprime uma voltagem senoidal ao sistema, é correto escrever a equação diferencial:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri = V_0 \text{sen} \omega t$$

e portanto:

$$\frac{\partial i}{\partial t} + \frac{R}{L} i = \frac{V_0}{L} \text{sen} \omega t$$

O fator integrante para a solução dessa equação é $e^{(R/L)t}$ ou ainda $e^{\int (R/L) dt}$

$$e^{(R/L)t} \frac{\partial i}{\partial t} + e^{(R/L)t} \frac{Ri}{L} = \frac{V_0}{L} e^{(R/L)t} \text{sen} \omega t .$$

Lembremos que

$$\left[e^{(R/L)t} \frac{\partial i}{\partial t} + e^{(R/L)t} \frac{Ri}{L} \right] = \frac{\partial}{\partial t} (i e^{(R/L)t}),$$

Substituindo no primeiro membro da equação anterior obtem-se:

²¹ Martins, Nelson; Introdução à Teoria da Eletricidade e do Magnetismo. Edgard Blücher, 1975 - 2ª edição

$$\frac{\partial}{\partial t}(ie^{(R/L)t}) = \frac{V_0}{L} e^{(R/L)t} \text{sen}\omega t ,$$

$$ie^{(R/L)t} = \frac{V_0}{L} \int_0^t e^{(R/L)t} \text{sen}\omega t ,$$

$$ie^{(R/L)t} = \frac{V_0}{L} \left\{ e^{(R/L)t} \left[\frac{(R/L)\text{sen}\omega t - \omega \cos\omega t}{(R^2/L^2) + \omega^2} \right] \right\}_0^t ,$$

$$ie^{(R/L)t} = \frac{V_0}{L} \left\{ e^{(R/L)t} \left[\frac{(R/L)\text{sen}\omega t - \omega \cos\omega t}{(R^2/L^2) + \omega^2} \right] - \frac{-\omega}{(R^2/L^2) + \omega^2} \right\} ,$$

$$ie^{(R/L)t} = V_0 \left\{ e^{(R/L)t} \left[\frac{(R/L)L\text{sen}\omega t - \omega L \cos\omega t}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] \right\} + V_0 \left[\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] ,$$

Lembrando-se que $R = Z \cos\delta$ e $\omega L = Z \text{sen}\delta$

$$ie^{(R/L)t} = V_0 \left\{ e^{(R/L)t} \frac{Z \cos\delta \text{sen}\omega t - Z \text{sen}\delta \cos\omega t}{Z^2} \right\} + V_0 \left[\frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \right] ,$$

$$i = \frac{V_0}{Z} \text{sen}(\omega t - \delta) + \frac{V_0}{Z^2} \omega L e^{(-R/L)t}$$

Equação 58

Decorrido um tempo suficientemente grande, o efeito transitório contido na Equação 58 tende a zero, e portanto:

$$i = \frac{V_0}{Z} \text{sen}(\omega t - \delta)$$

e para a f.e.m.

$$V(t) = V_0 \text{sen}\omega t$$

Mais uma vez se observa a f.e.m. avançada um ângulo de fase δ em relação à corrente.

8.7. Apêndice 05:

Esquema Eletrônico do Condicionador de Sinais do T.M. 13.

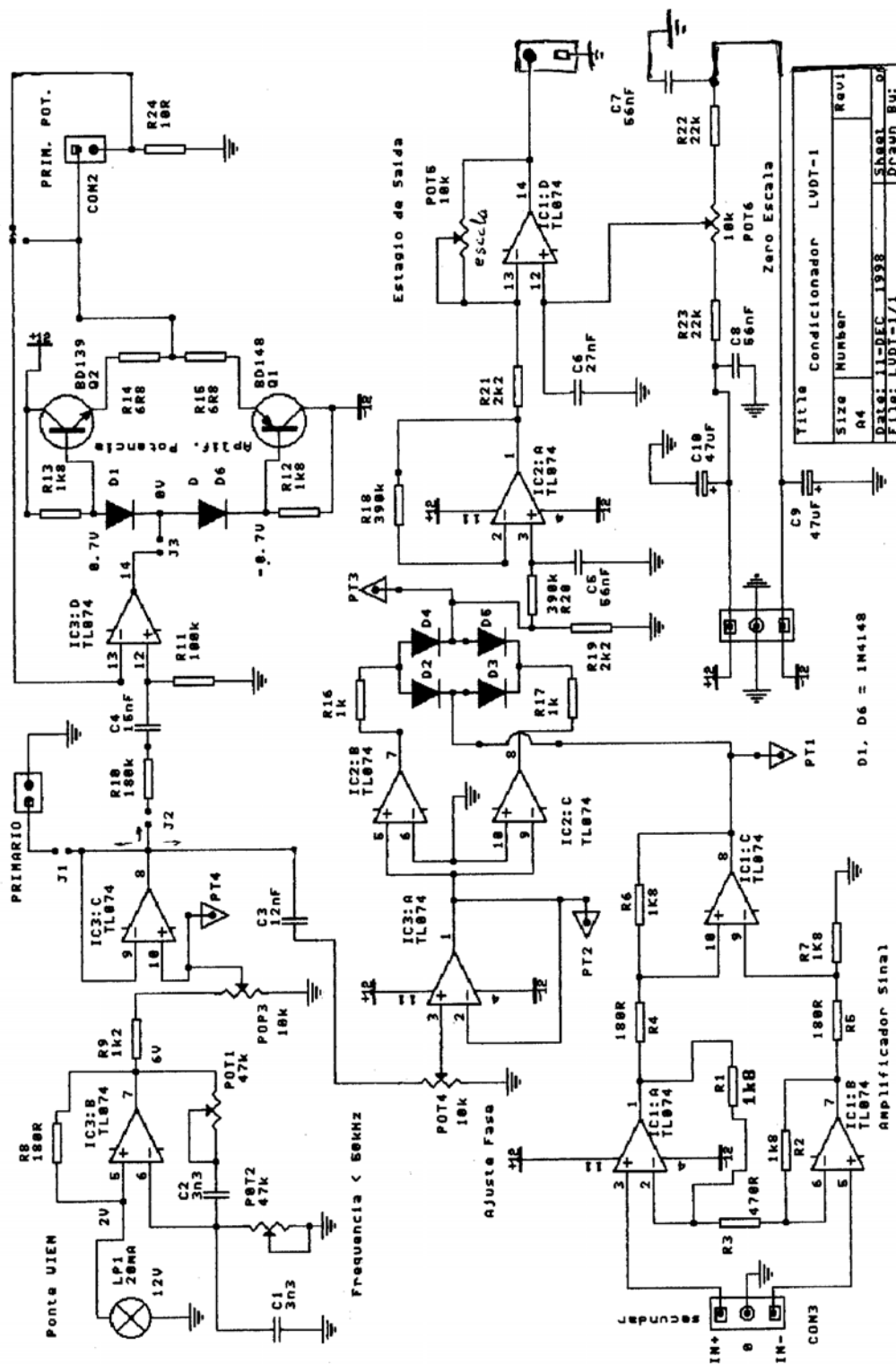


FIG. 112: Esquema Eletrônico do Condicionador de Sinais (LVDT) do Transdutor Magnético 13.