

CARLOS ROBERTO HALL BARBOSA

**ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS EM ESTRUTURAS METÁLICAS
UTILIZANDO O MAGNETÔMETRO SUPERCONDUTOR SQUID
E TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL**

TESE DE DOUTORADO

Departamento de Engenharia Elétrica

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, 08 de Julho de 1999

CARLOS ROBERTO HALL BARBOSA

**ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS EM ESTRUTURAS METÁLICAS
UTILIZANDO O MAGNETÔMETRO SUPERCONDUTOR SQUID
E TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica: Sistemas de Computação.

Orientador: Antonio Carlos O. Bruno (Depto. de Física)

Co-orientadores: Marley Vellasco e
Marco Aurélio Pacheco (Depto. de Eng. Elétrica)

Departamento de Engenharia Elétrica
Departamento de Física

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Rio de Janeiro, 08 de Julho de 1999



Essa tese faz parte dos resultados de um trabalho desenvolvido em colaboração entre o Departamento de Física e o Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

A parte experimental desta tese foi desenvolvida no Laboratório de Supercondutividade Aplicada e Magnetismo, do Grupo de Física Aplicada do Departamento de Física da PUC-Rio, bem como no *Electromagnetics Laboratory* do Departamento de Física e Astronomia da *Vanderbilt University*, Nashville, Tennessee.



A meus pais

Agradecimentos:

- a Eduardo Andrade Lima e Guilherme Sesto Kühner, pela amizade e importantes colaborações;
- aos Profs. Antonio Carlos Bruno, Paulo Costa Ribeiro e Elizabeth Costa Monteiro, pelo contínuo encorajamento e apoio;
- aos Profs. Marley Vellasco e Marco Aurélio Pacheco, pela orientação;
- A Edson Zanelli e João Rodrigues dos Santos, pelo auxílio inestimável na preparação de amostras e outras estruturas mecânicas;
- a Raquel Bacellar, pelo infatigável trabalho de apoio;
- aos demais amigos do LSAM, pela colaboração e pela amizade nestes dez anos de convívio e trabalho; e
- ao CNPq, pelo apoio financeiro que viabilizou a realização deste trabalho.

RESUMO

Esta Tese associa duas técnicas de fronteira na área de Ensaaios Não-Destrutivos magnéticos, que são a utilização do magnetômetro supercondutor SQUID como instrumento de medida e de Redes Neurais como ferramentas de análise dos sinais detectados. Medidas pioneiras com o SQUID foram realizadas em amostras de aço e de alumínio contendo defeitos diversos, e foram idealizados e implementados dois Sistemas Neurais, os quais utilizaram combinações de vários tipos de redes neurais para, a partir do campo magnético medido, obter informações a respeito da geometria dos defeitos, possibilitando assim estimar sua gravidade.

ABSTRACT

This Thesis combines two state-of-the-art techniques in the area of magnetic Nondestructive Evaluation, that is, the application of the superconducting magnetometer SQUID as the magnetic sensor, and the use of Neural Networks as analysis tools for the detected magnetic signals. Pioneering measurements using the SQUID have been made in steel and aluminum samples with various types of flaws, and two Neural Systems have been implemented, based on the combination of several neural networks algorithms. Such systems aim to, based on the measured magnetic field, obtain information about defect geometry, thus allowing the assessment of defect severity.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Métodos Magnéticos em Ensaios Não-Destrutivos.....	2
1.1.1. Correntes Induzidas – <i>Eddy Currents</i>	3
1.1.2. Injeção de Corrente – <i>Electric Current Injection</i>	3
1.1.3. Vazamento de Fluxo Magnético – <i>Magnetic Flux Leakage</i>	4
1.1.4. Medida da Susceptibilidade Magnética	5
1.2. Áreas de Aplicação de Métodos Magnéticos de END Consideradas	6
1.2.1. Indústria do Petróleo.....	6
1.2.2. Indústria Aeronáutica.....	8
1.3. O Magnetômetro Supercondutor SQUID.....	10
1.4. Técnicas Inteligentes.....	11
1.4.1. Detecção de Defeitos	11
1.4.2. Pré-processamento do sinal.....	12
1.4.3. Caracterização dos Defeitos	13
2. ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS COM O SQUID.....	14
2.1. O Magnetômetro Supercondutor SQUID.....	14
2.2. Aplicações do SQUID a Ensaios Não-Destrutivos Magnéticos.....	17
2.3. Medidas em Amostras de Aço.....	21
2.4. Medidas em Amostras de Alumínio	36
3. SIMULAÇÃO DOS DEFEITOS	41
3.1. Defeitos em Amostras de Aço: Elementos Finitos.....	41
3.1.1. Modelo de Elementos Finitos	42

SUMÁRIO (cont.)

3.1.2.	Validação Experimental do Modelo de Elementos Finitos.....	45
3.1.3.	Defeitos Simulados	52
3.2.	Defeitos em Amostras de Alumínio: <i>Boundary Integral Equations</i>	54
3.2.1.	Modelo por <i>Boundary Integral Equations</i>	55
3.2.2.	Validação Experimental do Modelo por <i>Boundary Integral Equations</i>	56
3.2.3.	Defeitos Simulados	60
4.	MODELOS DE TÉCNICAS INTELIGENTES APLICADOS A END	62
4.1.	Introdução	62
4.2.	Redes Neurais Artificiais	63
4.2.1.	<i>Multi-Layer Perceptron/Backpropagation</i> (MLP/BP)	67
4.2.2.	<i>Radial Basis Function</i> (RBF).....	70
4.2.3.	<i>Time-Delay Neural Networks</i> (TDNN).....	73
4.3.	Aplicações de Técnicas Inteligentes a END	76
4.3.1.	Redes Neurais do Tipo <i>Multi-Layer Perceptron/Back-Propagation</i>	76
4.3.2.	Redes Neurais do Tipo <i>Radial Basis Function</i> (RBF).....	76
4.3.3.	Redes Neurais do Tipo <i>Time-Delay Neural Networks</i> (TDNN).....	77
4.3.4.	Redes Neurais do Tipo <i>Hopfield</i>	77
4.4.	Modelos de Técnicas Inteligentes Aplicados à Caracterização de Defeitos em Amostras de Aço	78
4.4.1.	Detecção dos Defeitos	81
4.4.2.	Pré-processamento do Sinal	83
4.4.3.	Caracterização dos Defeitos	87

SUMÁRIO (cont.)

4.5. Modelos de Técnicas Inteligentes Aplicados à Caracterização de Defeitos em Amostras de Alumínio.....	93
4.5.1. Identificação do Sinal.....	95
4.5.2. Classificação do Sinal.....	97
4.5.3. Caracterização dos Defeitos.....	98
5. CONCLUSÃO.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
PUBLICAÇÕES.....	110



LISTA DE FIGURAS

1: Componentes básicos de um método magnético de END	2
2: Método de <i>eddy current</i> aplicado a uma placa condutora	3
3: Método da Injeção de Corrente Elétrica.....	4
4: Método de <i>Magnetic Flux Leakage</i> aplicado a uma barra metálica defeituosa	5
5: <i>Pig</i> magnético utilizado para inspeção de tubulações de petróleo	5
6: Método de medida da susceptibilidade	6
7: Trincas decorrentes de corrosão por fadiga em uma peça de aço inoxidável	7
8: Pits de corrosão típicos.....	7
9: Acidente ocorrido com um Boeing 737-200 da Aloha Airlines	8
10: Exemplos de trincas em rebites de fuselagem	9
11: Processo de crescimento das trincas em alumínio	9
12: Processo de Análise Automática de Sinais Obtidos com END	11
13: Criostato com hélio líquido que acondiciona o SQUID	14
14: Magnetômetro supercondutor SQUID	15
15: Alguns tipos de gradiômetro comumente utilizados.....	16
16: Mapeamento magnético de defeitos em um tubo de aço utilizando o SQUID	20
17: Gradiômetros existentes no sistema SQUID da <i>Vanderbilt University</i>	21
18: Montagem experimental utilizada para as medidas de estruturas de aço.....	22
19: Montagem experimental utilizada na <i>Vanderbilt University</i> para as medidas de estruturas de aço.....	22
20: Amostra quadrada de chapa de aço com um pit de corrosão comprometendo aproximadamente 70% da espessura da parede	23
21: Medida do <i>Pit</i> de Corrosão com o sensor de efeito Hall.....	23

LISTA DE FIGURAS (cont.)

22: Medida do <i>pit</i> de corrosão com o SQUID conectado ao gradiômetro axial	24
23: Comparação do sensor de efeito Hall com o SQUID.....	25
24: Comportamento do sistema de detecção com a distância entre sensor e amostra	26
25: Medidas do <i>pit</i> de corrosão natural na primeira amostra com o SQUID conectado ao gradiômetro planar	27
26: Conjunto de defeitos introduzidos na segunda amostra de fundo de tanque	28
27: Medidas dos defeitos artificiais na segunda amostra com o SQUID conectado ao gradiômetro planar.....	28
28: Sinal adquirido em uma linha de mapeamento e resultado da filtragem digital.....	29
29: Indicação das linhas utilizadas como sinais magnéticos unidimensionais	29
30: Sinais unidimensionais extraídos dos mapeamentos dos defeitos artificiais.....	30
31: Sinais unidimensionais extraídos dos mapeamentos do <i>pit</i> de corrosão natural.....	30
32: Montagem experimental utilizada na PUC-Rio para estruturas de aço	31
33: Comparação entre os sinais obtidos do <i>pit</i> natural e do <i>pit</i> gerado por EDM.....	32
34: Sinal da Figura 33 processado de forma a considerar os efeitos de um gradiômetro planar concêntrico.....	32
35: Perfis dos defeitos #1, #2 e #3 gerados por EDM e sinais magnéticos obtidos com o sensor de efeito Hall.....	33
36: Perfis dos defeitos #4, #5 e #6 gerados por EDM e sinais magnéticos obtidos com o sensor de efeito Hall.....	34
37: Perfis dos defeitos #7-8 gerados por EDM e sinais magnéticos obtidos com o sensor de efeito Hall.	35
38: Imagem magnética obtida com um sensor fluxgate de um furo retangular com 1 cm x 2 cm em uma placa de alumínio quadrada com 1 m de lado, a uma distância de 6 mm da superfície da chapa.....	36
39: Linha central do mapeamento mostrado na Figura 38.....	36

LISTA DE FIGURAS (cont.)

40: Imagem magnética obtida com um sensor SQUID de um <i>slot</i> com 1 cm x 1 mm em placas de alumínio quadradas com 30 cm de lado, a uma distância de 11 mm da superfície da chapa	37
41: Linha central do mapeamento mostrado na Figura 40.....	37
42: Amostra de alumínio contendo um orifício circular de 8 mm de diâmetro	38
43: Montagem experimental utilizada na PUC-Rio para medidas em alumínio	38
44: Medida do campo magnético associado à amostra com a trinca de 10 mm.....	39
45: Séries de medidas realizadas em alumínio com o SQUID na PUC-Rio.....	39
46: Séries de medidas realizadas em alumínio com o SQUID na PUC-Rio.....	40
47: Superposição dos sinais magnéticos referentes às diversas trincas	40
48: Curva B x H para o aço 1020	42
49: Caracterização Geométrica do Defeito Simulado	45
50: Campo de excitação gerado pela bobina supercondutora.....	46
51: Vista geral em corte da malha de elementos finitos.....	47
52: Vista ampliada da região da malha de elementos onde foi definido o defeito	48
53: Comparação entre os resultados experimentais e simulados.....	48
54: Seção reta longitudinal do tubo de aço, passando pelo centro dos defeitos	49
55: Corte longitudinal no tubo de aço, passando pelo centro do defeito em "V"	50
56: Corte longitudinal no tubo de aço, passando pelo centro do defeito em "U"	50
57: Comparação entre resultados experimentais e simulados para o defeito em "V":.....	51
58: Comparação entre resultados experimentais e simulados para o defeito em "U", com correção no formato das bordas	51
59: Imagem da densidade de fluxo magnética relativa à chapa de aço quadrada.....	52

LISTA DE FIGURAS (cont.)

60: Densidade de fluxo magnético líquida calculada para o gradiômetro.....	53
61: Linhas centrais das imagens magnéticas da Figura 59 e da Figura 60.	
a) Densidade de fluxo magnético calculada pelo modelo de elementos finitos.	
b) Densidade de fluxo líquida medida pelo gradiômetro.....	53
62: Linhas centrais das densidades de fluxo magnético líquidas	54
63: Campo magnético medido com um sensor fluxgate	56
64: Campo magnético calculado pelo modelo de BIE.....	57
65: Campo magnético obtido com um sensor SQUID	58
66: Campo magnético calculado pelo modelo de BIE.....	58
67: Comparação entre as linhas centrais dos sinais relativos à medida experimental com o SQUID e à medida simulada com o modelo BIE	59
68: Campo magnético gerado pela amostra de alumínio com 30 cm x 30 cm, com um orifício circular de 8 mm de diâmetro, calculado a uma distância de 13 mm.....	60
69: Campo magnético para amostras com e sem trincas	61
70: Elemento processador básico (neurônio) de uma rede neural.....	63
71: Classes mais comuns para as funções de ativação.....	64
72: Topologia das redes <i>multi-layer, feed-forward</i>	65
73: Topologia das redes recorrentes (p.ex. Hopfield)	66
74: Treinamento supervisionado	66
75: Treinamento não-supervisionado	67
76: i-ésimo neurônio da camada escondida de uma rede RBF.....	71
77: Um neurônio de uma rede TDNN	73
78: Exemplo de uma rede TDNN.....	75



LISTA DE FIGURAS (cont.)

79: Comparação entre os sinais simulados e experimentais, para as amostras de aço	78
80: Comparação entre os sinais simulados e experimentais, para as amostras de aço	79
81: Sistema neural proposto para análise dos sinais relativos às amostras de aço	80
82: Pulso triangular unitário que indica as posições dos centros dos defeitos	81
83: Exemplo de utilização da rede TDNN de detecção	82
84: Sistema utilizado para pré-processamento por redes neurais	83
85: Padrões de entrada e saída para treinamento da rede de pré-processamento	84
86: Valores de MSE obtidos para os padrões de teste com as redes MLP	84
87: Testes da rede treinada com sinais relativos ao pit natural	85
88: Testes da rede treinada com sinais relativos ao defeito #4	85
89: Testes da rede treinada com sinais relativos ao defeito #3	86
90: Testes da rede treinada com sinais relativos ao defeito #2	86
91: Testes da rede treinada com sinais relativos ao defeito #1	87
92: Padrões de entrada e saída da rede RBF para caracterização dos defeitos	88
93: Exemplos de aplicação da rede RBF treinada para caracterização dos defeitos	89
94: Padrões de entrada e saída da rede RBF para caracterização dos defeitos	90
95: Exemplos de aplicação da rede RBF de caracterização dos defeitos	91
96: Exemplos de aplicação da rede RBF de caracterização dos defeitos	92
97: Comparação entre os sinais simulados e experimentais, para as amostras de alumínio	93
98: Sistema neural proposto para análise dos sinais das amostras de alumínio	94
99: Exemplo de utilização da rede TDNN de detecção	96
100: Exemplo de utilização da rede MLP de classificação	98
101: Exemplo de utilização da rede MLP de caracterização	99

LISTA DE TABELAS

1: Configuração de conexões entre os SQUIDS e os gradiômetros disponíveis no sistema da <i>Vanderbilt University</i>	21
2: Resultados obtidos com as redes TDNN para as amostras de aço, variando o número de elementos da camada escondida (N) e o número de atrasos da camada de entrada (D)	82
3: Resultados obtidos com as redes TDNN para as amostras de alumínio, variando o número de elementos da camada escondida (N) e o número de atrasos da camada de entrada (D)	96

