

**Márcio Jardim de Oliveira**

**INDICAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM  
MATERIAIS METÁLICOS E COMPÓSITOS:  
UMA COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS  
NÃO DESTRUTIVOS**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Rio de Janeiro

Abril de 2014



**Márcio Jardim de Oliveira**

**INDICAÇÃO DE DESCONTINUIDADES EM  
MATERIAIS METÁLICOS E COMPÓSITOS:  
UMA COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS  
NÃO DESTRUTIVOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marcos Venicius Soares Pereira**

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

**Prof. Fathi Ibrahim Darwish**

Universidade Federal Fluminense

**Prof. Felipe José da Silva**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro

**Prof. Sérgio Damasceno Soares**

CENPES/Petrobrás

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Abril de 2014.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Márcio Jardim de Oliveira**

Graduou-se em engenharia mecânica na Fundação Técnico Educacional Souza Marques em 1996. Trabalhou como desenhista, projetista, supervisor e coordenador em indústrias mecânicas por mais de 20 anos. Pós-graduado em docência do ensino superior. É professor da disciplina de desenho técnico da FAETEC desde 1998. Coordenador do curso técnico de mecânica do IFRJ.

#### Ficha Catalográfica

Oliveira, Márcio Jardim de

Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos / Márcio Jardim de Oliveira ; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – 2014.

140 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Ensaios de materiais. 3. Descontinuidades simuladas. 4. Radiação penetrante. 5. Partículas magnéticas. 6. Ultrassom. I. Pereira, Marcos Venicius Soares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. III. Título.

CDD:620.11

A minha esposa Daysi e minha filha Débora.

## Agradecimentos

Somente quem escreve uma dissertação de mestrado, tese de doutorado ou até mesmo um livro, sabe o trabalho árduo e estafante que essa tarefa impõe. Quantas vezes a obrigação nos exige postergar um passeio, uma visita ou um dia de felicidade com quem amamos. Por isso, nesse momento agradeço a todos que com amor, amizade, carinho e apoio, de uma maneira ou outra contribuíram para realização desse trabalho.

Primeiramente a Deus, pois sem ele em nossas vidas nada seria possível.

Aos meus pais Mario e Zulimar, pois foram os alicerces dessa caminhada.

A todos os colaboradores da empresa Arctest principalmente ao Sr. Paulo Stampone e ao amigo Mario Moura por todo auxílio durante a realização dos ensaios não destrutivos.

Aos amigos André Rocha Pimenta, José Maria Paolucci e Roberto Rocco e pelo incentivo.

Ao professor Francisco Nipo do CEFET Itaguaí pela ajuda nos ensaios de ultrassom.

A todos os professores e funcionários do DEMa por todo apoio e conhecimento passado de forma motivadora.

Ao CAPES e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos os companheiros de Mestrado em especial Gilvania Terto, Roberta Amorim e Alex Galiza por todas as alegrias e tristezas compartilhadas.

Ao Prof. Marcos Venicius Soares Pereira por sua amizade, orientação, paciência, apoio e principalmente por suas aulas inspiradoras de mecânica da fratura.

## Resumo

Oliveira, Márcio Jardim de Oliveira; Pereira, Marcos Venicius Soares (orientador). **Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos.** Rio de Janeiro, 2014. 140 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O parque industrial nos países em desenvolvimento necessita, cada vez mais, se adaptar a uma nova filosofia de serviço em que equipamentos considerados como seguros são aqueles que podem ser inspecionados de forma confiável. Neste contexto, ensaios não destrutivos (END) são valiosas ferramentas usadas no controle de qualidade, manutenção de componentes e, principalmente, na avaliação da integridade estrutural de tais equipamentos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de diferentes técnicas de END (radiação penetrante, partículas magnéticas e ultrassom) na detecção de descontinuidades simuladas em amostras de material metálico e de compósito. Os resultados experimentais mostraram que os ensaios com raios X, dentre todas as técnicas adotadas na inspeção da amostra metálica, apresentou a maior eficiência na detecção das diferentes geometrias de descontinuidades. Entretanto, nenhuma das técnicas de END possibilitou a detecção de descontinuidades na amostra do material compósito.

## Palavras-chave

Ensaio de materiais; descontinuidades simuladas; radiação penetrante; partículas magnéticas; ultrassom.

## Abstract

Oliveira, Márcio Jardim de; Pereira, Marcos Venicius Soares (Advisor); Pereira. **Discontinuities indication in metallic and composite materials: a comparison of non-destructive methods.** Rio de Janeiro, 2014. 140 p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia de Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The industrial park in developing countries need, increasingly, to adapt to a new service philosophy in which equipments considered as safe are those that can be inspected in a reliable way. In this context, non-destructive testing (NDT) are valuable tools used in quality control, maintenance of components and especially in assessing the structural integrity of such equipment. This study aimed to evaluate the efficiency of different NDT techniques (penetrating radiation, ultrasound and magnetic particles) in the detection of simulated discontinuities in samples of metallic and composite materials. The experimental results showed that the X-ray, considering all techniques adopted in the inspection of the metallic sample, showed the highest efficiency in the detection of different geometries of discontinuities. However, anynone of NDT techniques allowed the detection of discontinuities in the sample of the composite material.

## Keywords

Materials testing; simulated discontinuities; penetrating radiation; magnetic particles; ultrasound.

# Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1. Ensaios destrutivos	20
2.2. Ensaios não destrutivos	22
2.3. Ultrassom	29
2.3.1. Histórico	29
2.3.2. Princípios do método	30
2.3.3. Velocidade de propagação	32
2.3.4. Atenuação sônica	33
2.3.5. Impedância acústica	34
2.3.6. Comportamento do feixe sônico	35
2.3.7. Campo próximo	36
2.3.8. Campo distante	36
2.3.9. Propagação das ondas	37
2.3.9.1. Ondas longitudinais	37
2.3.9.2. Ondas transversais	38
2.3.9.3. Ondas superficiais	39
2.3.9.4. Ondas Lamb	40
2.4. Equipamentos do ensaio	41
2.4.1. Cabeçotes	42
2.4.1.1. Cabeçote normal ou reto	43
2.4.1.2. Cabeçote angular	43
2.4.1.3. Cabeçote duplo cristal	44
2.5. Acoplantes	45
2.6. Técnicas de inspeção	45
2.6.1. Método de pulso-eco	46
2.6.2. Método da transparência	47
2.6.3. Método por imersão	47
2.7. Vantagens e desvantagens do ensaio por ultrassom	48

2.8. Raios X	49
2.8.1. Histórico	49
2.9. Radioatividade natural e artificial	50
2.10. Fontes de radiação ionizante	54
2.11. Propriedade dos raios X	54
2.12. Produção dos raios X	54
2.13. Produção dos raios gama	56
2.14. Atividade de uma fonte radioativa	58
2.15. Meia vida	59
2.16. Irradiadores	60
2.17. Detectores de radiação	61
2.18. Registro radiográfico	62
2.19. Método de trabalho	62
2.20 Indicadores de qualidade de imagem (IQI)	63
2.20.1. IQI de arame ou fio	64
2.20.2. IQI de chapa ou furo	65
2.21. Vantagens e desvantagens do ensaio por radiação penetrante	66
2.22. Ensaio por partículas magnéticas	66
2.22.1 Histórico	66
2.22.2. Principais grandezas	67
2.22.2.1. Pólos magnéticos	67
2.22.2.2. Campo magnético	67
2.22.2.3. Fluxo magnético	68
2.22.2.4. Permeabilidade magnética	69
2.23. Classificação magnética dos materiais	69
2.24. Histerese magnética	70
2.25 Descrição da técnica	71
2.26. Métodos de magnetização	72
2.26.1. Magnetização longitudinal	72
2.26.2. Magnetização circular	73
2.26.3 Magnetização multidirecional	74
2.27. Técnicas de magnetização	75
2.27.1 Técnica do Yoke	76

2.28. Desmagnetização	77
2.29. Partículas magnéticas	77
2.30. Vantagens e desvantagens do ensaio	78
3. MATERIAIS E MÉTODOS	80
3.1. Preparação das amostras	81
3.1.1. Amostra metálica	81
3.1.2. Amostra de compósito	86
3.2. Ensaio radiográficos	91
3.3. Ensaio radiográfico computadorizado	103
3.4. Equipamento radiográfico	103
3.5. Partículas magnéticas	104
3.6. Aparelho	104
3.7. Processos	105
3.7.1. Via úmida visível	105
3.7.2. Via úmida fluorescente	107
3.8 Ensaio por ultrassom	109
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	112
4.1. Ensaio radiográfico	115
4.2. Ensaio por partículas magnéticas	127
4.3. Ensaio por ultrassom	131
4.4. Comparação entre as técnicas adotadas	134
5.0. CONCLUSÕES	135
6.0. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	137
7.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

## Lista de figuras

Figura 1 - Exemplos de corpos de prova usados nos ensaios destrutivos [3]	21
Figura 2 - Descontinuidades superficiais e subsuperficiais e seus diferentes métodos de detecção. Adaptada de [10]	25
Figura 3 - Descontinuidades internas e seus diferentes métodos de detecção. Adaptada de [10]	25
Figura 4 - Inspeção externa não intrusiva de esfera. A - Montagem de andaimes pela parte externa da esfera; B - Utilização de inspetores escaladores na inspeção externa;	26
Figura 5 - Tipos de sons em função da frequência [22]	31
Figura 6 - Esquema de inspeção ultrassônica e gráfico. Adaptada de [1]	31
Figura 7 - Princípio básico do método por ultrassom [22]	32
Figura 8 - Reflexão e transmissão da onda sônica [18]	35
Figura 9 - Áreas ou zonas do feixe sônico [22]	35
Figura 10 - Estruturas atômicas, gás, líquido e sólido [18]	37
Figura 11 - Esquema de propagação das ondas longitudinais. Adaptada [24]	38
Figura 12 - Esquema de propagação das ondas de compressão [25]	39
Figura 13 - Esquema de propagação das ondas Rayleigh. Adaptada de [24]	40
Figura 14 - Propagação das ondas Lamb. Adaptada de [24]	41
Figura 15 - Principais elementos de um cabeçote padrão [25]	42
Figura 16 - Esquema de um cabeçote normal ou reto [22]	
Figura 17 - Esquema básico de um transdutor angular. Adaptada de [24]	44
Figura 18 - Esquema básico de um cabeçote duplo cristal [22]	45
Figura 19 - Representação esquemática da técnica ultrassônica de pulso-eco [22]	46

Figura 20 - Representação esquemática da técnica ultrassônica por transparência [22]	47
Figura 21 - Esquema da técnica ultrassônica por imersão [22]	48
Figura 22 - Radiografia da mão de Bertha esposa de Roentgen [27]	50
Figura 23 - Modelo atômico apresentado por Rutherford-Bohr. Adaptada [29]	51
Figura 24 - Camadas eletrônicas e níveis de energia [7]	51
Figura 25 - Espectro magnético [31]	52
Figura 26 - Tubo de Colidge [30]	55
Figura 27 - Tubo gerador de raios X [33]	55
Figura 28 - Desenho esquemático representando a radioatividade [35]	56
Figura 29 - Curva de decaimento do Iridio [25]	59
Figura 30 - Fonte selada radioativa [27]	60
Figura 31 - Foto de um irradiador	61
Figura 32 - Desenho esquemático de um irradiador em corte [25]	61
Figura 33 - Composição do filme radiográfico [30]	62
Figura 34 - Fundamentos do ensaio radiográfico [11]	63
Figura 35 - Posicionamento do IQI [30]	64
Figura 36 - IQI tipo fio (Norma ASTM) [25]	65
Figura 37 - IQI tipo furo (Norma ASTM) [30]	65
Figura 38 - Imã com pólos magnéticos norte e sul [42]	67
Figura 39 - Representação dos campo magnéticos e as linhas de indução [42]	68
Figura 40 - Campo magnéticos longitudinal, circular e descontinuidades em diferentes angulações. Adaptada de [24]	69
Figura 41 - Curva de histerese magnética B (densidade de fluxo) x H (força magnetizante)	71
Figura 42 - Origem dos campos de fuga [42]	72
Figura 43 - Exemplo de componente sob ação da magnetização longitudinal. Adpatada de [24]	73
Figura 44 - Exemplo de um componente sob ação da magnetização circular. Adaptada de [24]	74
Figura 45 - Esquema básico de um yoke. [25]	76

Figura 46 - Esquema de um yoke em uso. Adaptada de [24]	77
Figura 47 - Tambor metálico	80
Figura 48 - Tubo de compósito	81
Figura 49 - Esquema de retirada da amostra metálica	82
Figura 50 - Detalhamento das descontinuidades circulares amostra metálica	83
Figura 51 - Representação esquemática dos diâmetros adotados nas furações das amostras	83
Figura 52 - Representação esquemática das espessuras residuais de parede (%) após furação das amostras	84
Figura 53 - Detalhamento das descontinuidades lineares verticais na amostra metálica	84
Figura 54 - Detalhamento das descontinuidades lineares horizontais na amostra metálica	85
Figura 55 - Detalhamento das descontinuidades irregulares na amostra metálica	85
Figura 56 - Conjunto de descontinuidades usinadas por eletroerosão na amostra metálica	86
Figura 57 - Confecção de descontinuidades com espátula	87
Figura 58 - Numeração de 1 a 3 nas descontinuidades	87
Figura 59 - Confecção das descontinuidades com ferro de solda	
Figura 60 - Numeração de 4 a 6 nas descontinuidades	88
Figura 61 - Ferramentas utilizadas	89
Figura 62 - Fluxograma ilustrando o procedimento experimental	90
Figura 63 - Bunker usado nos ensaios radiográficos	91
Figura 64 - Irradiador adotado nos experimentos	93
Figura 65 - Comando a distância para liberação dos isótopos	93
Figura 66 - Equipamento usado nos ensaios por raios -X	94
Figura 67 - Filme radiográfico KODAK M100 usado no ensaio	95
Figura 68 - Etiqueta do filme usado	95
Figura 69 - Telas intensificadoras	96
Figura 70 - Etiqueta identificadora Arctest	97

Figura 71 - Identificação do filme radiográfico	97
Figura 72 - Desenho esquemático da montagem do Chassi	98
Figura 73 - Chassi, tela intensificador e filme	98
Figura 74 - Posicionamento do IQI	94
Figura 75 - Distância fonte filme na amostra metálica	100
Figura 76 - Distância fonte filme no tubo de compósito	100
Figura 77 - Layout do laboratório	101
Figura 78 - Desenho esquemático do tanque com agentes químicos usados na revelação dos filmes radiográficos	102
Figura 79 - Secagem do filme na estufa	103
Figura 80 - Laboratório para execução ensaio radiográfico computadorizado	104
Figura 81 - Yoke usado no ensaio	105
Figura 82 - Tinta de contraste usada no ensaio por partículas magnéticas	106
Figura 83 - Tinta de constraste sendo usada na amostra metálica	106
Figura 84 - Execução do ensaio por partículas magnéticas	107
Figura 85 - Inspeção com as pernas do yoke na medida de 100 mm	108
Figura 86 - Inspeção com as pernas do yoke na medida de 30 mm	108
Figura 87 - Execução do ensaio por ultrassom método pulso eco na amostra metálica	109
Figura 88 - Execução do ensaio por ultrassom método pulso eco na amostra do tubo compósito	110
Figura 89 - Calibração do aparelho de ultrassom	111
Figura 90 - Execução do ensaio por ultrassom pelo método medição de espessura na amostra do tubo compósito	111
Figura 91 - Representação esquemática das descontinuidades simuladas na amostra metálica	112
Figura 92 - Representação esquemática das descontinuidades simuladas na amostra do compósito	114
Figura 93 - Radiografia convencional com Selênio - 75 na amostra metálica	115
Figura 94 - Radiografia convencional com Selênio - 75	

na amostra metálica, após tratamento digital de imagem	116
Figura 95 - Radiografia computadorizada com Selênio - 75 na amostra metálica	116
Figura 96 - Radiografia computadorizada com Selênio - 75	117
Figura 97 - Radiografia convencional com Irídio - 192 na amostra metálica	117
Figura 98 - Radiografia convencional com Irídio - 192 na amostra metálica, após tratamento digital de imagem	118
Figura 99 - Radiografia computadorizada com Irídio - 192 na amostra metálica	118
Figura 100 - Radiografia computadorizada com Irídio - 192 na amostra metálica, após tratamento digital de imagem	119
Figura 101 - Radiografia convencional com raios X na amostra metálica	119
Figura 102 - Radiografia convencional com raios X na amostra metálica após tratamento digital de imagem	120
Figura 103 - Radiografia computadorizada com raios X na amostra metálica	121
Figura 104 - Radiografia computadorizada com raios X na amostra metálica, após tratamento digital de imagem	121
Figura 105 - Radiografia convencional com Selênio - 75 na amostra do compósito	122
Figura 106 - Radiografia convencional com Selênio - 75 na amostra do compósito, após tratamento digital de imagem	122
Figura 107 - Radiografia digital com Selênio -75 na amostra do compósito	122
Figura 108 - Radiografia digital com Selênio - 75 na amostra do compósito, após tratamento digital de imagem	123
Figura 109 - Radiografia convencional com Irídio - 192 na amostra do compósito	123
Figura 110 - Radiografia convencional com Irídio - 192 na amostra do compósito, após tratamento digital de imagem	124
Figura 111 - Radiografia digital com Irídio - 192	

na amostra do compósito	124
Figura 112 - Radiografia digital com Irídio - 192 na amostra do compósito, após tratamento digital de imagem	125
Figura 113 - Radiografia convencional com raios X na amostra do compósito	125
Figura 114 - Radiografia convencional com raios X na amostra do compósito, após tratamento digital de imagem	126
Figura 115 - Radiografia digital com raios X na amostra do compósito	126
Figura 116 - Radiografia digital com raios X na amostra do compósito, após tratamento digital de imagem	126
Figura 117 - Detecção de descontinuidade linear (1).	127
Figura 118 - Detecção das descontinuidades circulares (8,9, 11 e 12)	128
Figura 119 - Detecção de descontinuidade irregular (3)	128
Figura 120 - Descontinuidades não detectadas no ensaio método via úmida colorida.	129
Figura 121 - Detecção de descontinuidade linear (1).	129
Figura 122 - Detecção das descontinuidades circulares.	130
Figura 123 - Descontinuidades não detectadas no ensaio por via úmida fluorescente.	130
Figura 124 - Tela do aparelho método pulso-eco na região sem descontinuidades da amostra metálica.	132
Figura 125 - Tela do aparelho método pulso eco na região com descontinuidades da amostra metálica.	132
Figura 126 - Medição da espessura da parede do tubo compósito 3,9 mm.	133
Figura 127 - Medição da espessura da parede do tubo compósito 4,9 mm.	133

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Métodos de ensaio x variáveis. Adaptada de [8]	24
Tabela 2 - Comparação entre ensaios não destrutivos. Adaptada de [14]	28
Tabela 3 – Atenuação sônica de diferentes materiais [22].	34
Tabela 4 - Diferenças entre transdutores ultrassônicos Adaptada de [1]	42
Tabela 5 – Comparação entre os raios penetrantes X e gama. Adaptada de [31].	54
Tabela 6 - Principais radioisótopos usados nos raios gama	57
Tabela 7 - Comparação entre variáveis que interferem na escolha das radiações penetrantes [35].	58
Tabela 8 – Vantagens e limitações das técnicas de magnetização [24].	75
Tabela 9 – Grupo material 1.	91
Tabela 10 – Atividade dos isótopos usados nos ensaios radiográficos.	92
Tabela 11 – Modelos de irradiadores usados nos ensaios radiográficos.	92
Tabela 12 – Comparação entre tipos e classes de filmes.	94
Tabela 13 – Espessura das telas intensificadoras	96
Tabela 14 – Equivalência entre os IQI's.	99
Tabela 15 – Tempos de exposição das radiografias.	101
Tabela 16 – Agentes químicos usados na revelação dos filmes radiográficos.	102
Tabela 17 – Yoke usado no ensaio por partículas magnéticas;	105
Tabela 18 – Dimensões e profundidades das descontinuidades na amostra metálica.	113
Tabela 19 – Dimensões e profundidades das descontinuidades na amostra do compósito.	114
Tabela 20 - Detecção das descontinuidades na amostra metálica	134
Tabela 21 - Detecção das descontinuidades na amostra do compósito	134