

Aplicação de Processamento Digital sobre Imagens Neutronográficas para Detecção de Corrosão em Alumínio

AILTON FERNANDO DIAS
ARNALDO DE ALBUQUERQUE ARAÚJO
VERGÍNIA REIS CRISPIM

¹CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Caixa Postal 941
30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil
afdcdt@dcc.ufmg.br

²UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais
Caixa Postal 702
30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil
arnaldo@dcc.ufmg.br

³UFRJ - Universidade Federal de Minas Gerais
Caixa Postal 68509
21945-970 Rio de Janeiro, RJ, Brasil
verginia@nuclear.com.ufrj.br

Abstract. Neutron radiography has been widely employed to investigate corrosion in aluminum aircraft components. It was developed a neutron radiographic image analyzer that has embedded several image processing routines (preprocessing, filtering, edge enhancement, segmentation, measurement and, pseudo coloring and image comparison.). Radiographic negatives were digitized by two ways: (a) using a *ScanJet IIp* flat scanner and, (b) using a *Sony DXC-107* CCD camera and a monochrome frame-grabber. The good results of the employment of digital image processing on neutron radiographic images for aluminum corrosion detection have encouraged us to continue the researches and to develop a real-time neutron radiography imaging system.

1. Introdução

Este trabalho descreve a aplicação de rotinas de processamento digital de imagens (PDI) a imagens neutronográficas produzidas no reator Argonauta, do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), no Rio de Janeiro, com a finalidade de investigar e detectar os efeitos de corrosão sobre peças construídas em alumínio. A neutronografia (ou radiografia com nêutrons) é uma técnica de ensaio não-destrutivo aplicada em casos especiais de inspeção, onde não se obtém boas radiografias a partir de raios-X ou raios γ [Berger (1965)]. O analisador de imagens empregado, desenvolvido especificamente para análise de imagens neutronográficas [Dias (1994)], incorpora funções específicas para minimizar degradações inerentes ao método neutronográfico e oferece funções para filtragem, realce, segmentação e medição sobre imagens neutronográficas. A detecção de corrosão em peças de alumínio é largamente empregada na inspeção de aeronaves.

1.1. Ensaios neutronográficos

As primeiras experiências bem-sucedidas em neutronografia foram realizadas por Kallmann e Kuhn, entre 1935 e 1939, na Alemanha. Desde então, a neutronografia tem se caracterizado como uma importante técnica de ensaio não-destrutivo, especialmente útil na inspeção de materiais hidrogenados e capaz de revelar detalhes invisíveis aos demais métodos radiográficos. O método de obtenção de neutronografias é baseado no registro da imagem produzida por um objeto posicionado entre um fluxo colimado de nêutrons e o conjunto conversor-filme. A imagem neutronográfica é formada indiretamente pelos nêutrons que, após atravessarem o objeto, interagem com o conversor, causando a emissão de radiações γ e β que impressionam o filme, conforme é mostrado na Figura 1.

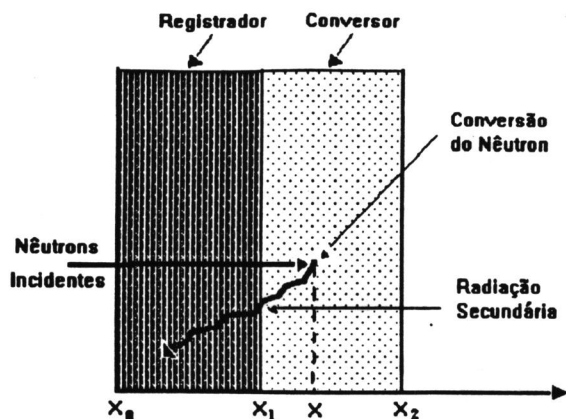


Figura 1: registro de imagens neutrográficas.

1.2. Dispositivo neutrográfico

O reator Argonauta comporta-se como uma fonte de nêutrons distribuída, sendo um reator de pesquisa, refrigerado por convecção natural ou forçada da própria água leve empregada para moderação. O Argonauta utiliza urânio enriquecido a 19,91 % em ^{235}U , na forma de óxido de urânio (U_3O_8), como combustível nuclear. A potência máxima na configuração de uma lâmina (seis elementos combustíveis) é de 5 kW , sendo que, para aplicações em pesquisa e treinamento, é usual operá-lo a 200 W . No núcleo, os fluxos máximos teóricos de nêutrons térmicos e rápidos são de $4,4 \times 10^9\text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ e $8,9 \times 10^9\text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Como pode ser observado na Figura 2, ao sair do núcleo, o feixe de nêutrons térmicos atravessa o canal de irradiação J-9, onde há dois colimadores de grafita. No plano da imagem, para o reator operando a 170 W , o fluxo medido de nêutrons térmicos é de $2,0 \times 10^5\text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, para uma razão

de colimação de 102, uma razão nêutron/ γ de $5,4 \times 10^6\text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mR}^{-1}$, e uma razão de cádmio igual a 20 [Crispim (1993)].

1.3. Digitalização das imagens

As imagens, registradas em filmes radiográficos, foram digitalizadas de duas formas: (a) usando um scanner (digitalizador) de mesa *HP ScanJet IIp* e uma fonte externa de iluminação (Figura 3) e (b) usando uma câmara CCD *Sony DXC-107*, um *frame-grabber* monocromático e uma fonte de luz (Figura 4). Em ambos os casos, a fonte de iluminação externa é necessária devido à alta densidade óptica dos negativos radiográficos [Dias (1994)].

2. Analisador de Imagens

As imagens neutrográficas sofrem os efeitos de cinco tipos de degradações: (a) espalhamento devido às reações entre os nêutrons e os núcleos dos materiais; (b) pontilhamento devido à textura dos materiais; (c) granularidade do filme radiográfico; (d) falta de uniformidade do feixe neutrônico; e (e) falhas na iluminação durante a aquisição das imagens. Para minimizar os efeitos dessas degradações, foram implementadas duas classes de funções de PDI no analisador: (a) pré-processamento (controle de brilho, realce de contraste, correção da iluminação e equalização histogramica) e (b) filtragem espacial (média, mediana, soma das diferenças absolutas [Araújo (1985)], *noise cheating* e média de múltiplas imagens). Além dessas, outras classes de funções de PDI incorporadas ao analisador de imagens são realce de bordas, medições dimensionais, pseudocoloração e comparação de imagens.

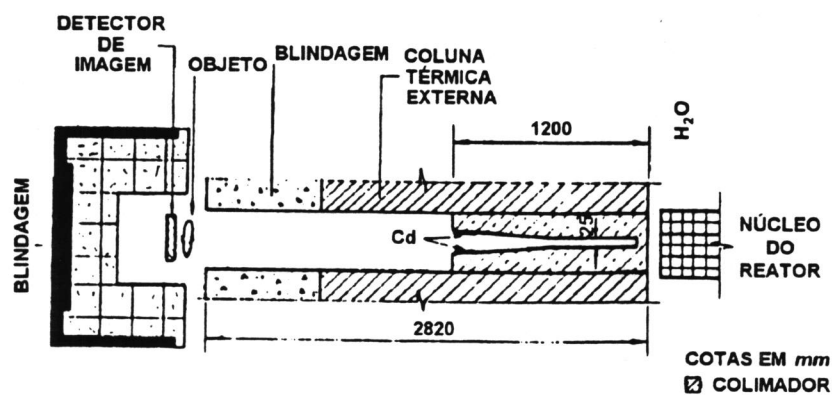


Figura 2: sistema colimador instalado no canal J-9 do reator Argonauta.
FONTE: CRISPIM, 1993, p.84.

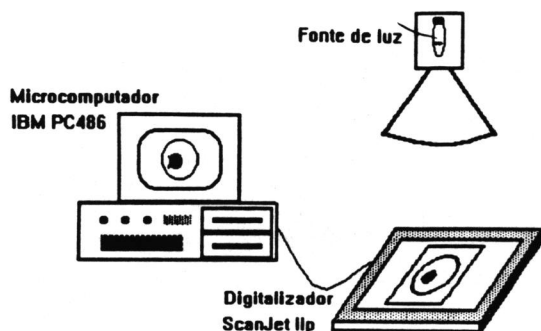


Figura 3: digitalização de negativos usando o scanner.

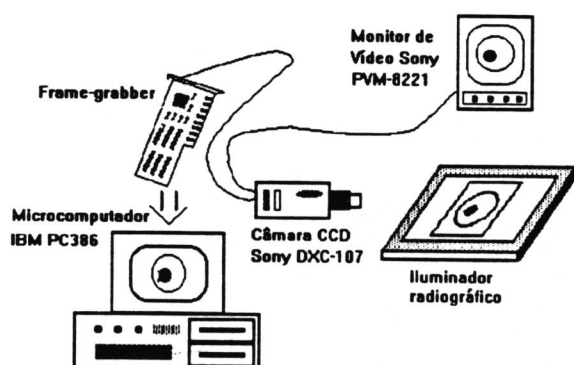


Figura 4: digitalização de negativos com câmara CCD.

O analisador de imagens que integra o sistema NEUTRA [Dias (1994)] foi desenvolvido com o objetivo de ilustrar a potencialidade da aplicação de PDI a imagens neutronográficas, quando se deseja realçar detalhes presentes nas imagens, restaurar degradações sofridas durante a aquisição das imagens, segmentar regiões das imagens, realizar medições dimensionais sobre áreas das imagens etc. O NEUTRA constitui uma ferramenta dedicada, versátil e abrangente, capaz de auxiliar o especialista em neutrografia na visualização e na análise de resultados de ensaios radiográficos. Para isto, baseou-se numa aplicação sobre a plataforma IBM-PC, empregando-se a interface *PixelWare* [Davis Jr. (1992)], desenvolvida no Departamento de Ciência da Computação (DCC) da UFMG.

2.1 Sistema *PixelWare*

O analisador de imagens, cuja tela de apresentação é mostrada na Figura 5, foi implementado a partir do sistema *PixelWare*, um sistema de PDI modular, expansível e amigável, baseado em uma interface gráfica com o usuário. O *PixelWare* foi concebido para utilizar apenas os 640 kB de memória gerenciados pelo sistema operacional DOS, sendo que as imagens por ele

processadas são mantidas permanentemente em disco e as funções de PDI operam sobre pequenas porções das mesmas. A única limitação quanto ao tamanho das imagens processadas é imposta pelo espaço de armazenamento disponível em disco.

O sistema *PixelWare* opera sobre imagens no formato BM (*BitMap*), descrito por Davis (1992), que é um formato não-compactado, o que simplifica o processamento por não exigir da CPU a compressão e a descompressão dos arquivos a cada acesso aos mesmos. Além disso, sua definição facilita a representação da estrutura bidimensional correspondente às imagens.

2.2. Pré-processamento de imagens

O pré-processamento tem por objetivo corrigir as degradações sofridas pelas imagens em função de baixa intensidade e falta de uniformidade do feixe neutrônico, imperfeições do conversor, baixo tempo de exposição do filme radiográfico e deficiências na iluminação da superfície do digitalizador. Essas degradações afetam o brilho, o contraste e a resolução das imagens radiográficas, sendo que os efeitos sobre o brilho e o contraste podem ser minimizados ou mesmo suprimidos através das operações de controle de brilho, correção do nível de cinza, expansão de contraste e equalização histográfica.

2.3. Filtragem de ruídos

O método de registro de imagens por exposição direta de filmes radiográficos sofre degradações devidas à granulação do filme, que podem ser restauradas por meio da técnica *noise cheating* (despistamento do ruído) [Pratt (1978)] ou por meio de filtragem espacial, escolhendo-se uma vizinhança adequada à dimensão dos grânulos da imagem. Dois fatores característicos da técnica neutronográfica acarretam o surgimento de degradações devidas à presença de radiação γ associada ao feixe neutrônico, que forma uma imagem de ruído no filme sobreposta à imagem dos nêutrons e, devidas ao espalhamento dos nêutrons ao atravessarem o objeto sob análise. Esse espalhamento causa acentuado borramento das bordas e manifesta-se sob a forma de ruído pontilhado, produzido pela interação dos nêutrons com as rugosidades dos objetos [Jain (1989)]. A redução do ruído de pontilhamento pode ser obtido pela aplicação de filtragem espacial ou do cálculo da média de múltiplas imagens, enquanto o borramento das bordas pode ser minimizado pela aplicação de funções de aguçamento de bordas (filtragem passa-altas). O ruído produzido pela radiação γ pode ser suprimido aplicando-se as operações de corte, limiarização e fatiamento de nível após a inspeção do histograma da imagem.

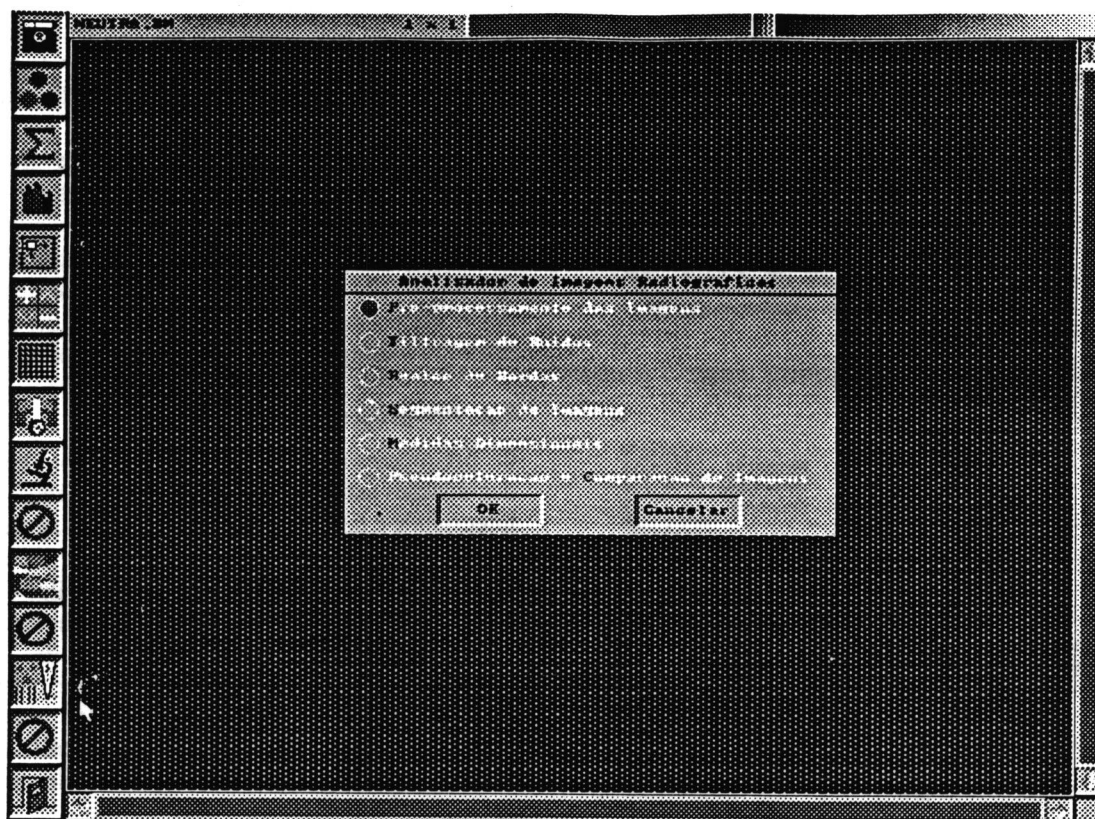


Figura 5: tela de apresentação do analisador de imagens.

3. Detecção de Corrosão em Alumínio

Muitos métodos de ensaios não-destrutivos têm sido empregados para detectar corrosão em estruturas metálicas. Dentre esses métodos, a neutrongrafia apresenta grandes vantagens devido à excelente sensibilidade que os nêutrons possuem na detecção do hidrogênio presente nos produtos de corrosão. Os nêutrons sofrem acentuada atenuação ao se chocarem com o hidrogênio e são relativamente transparentes à maioria das ligas metálicas, o que permite a detecção antecipada de corrosão oculta em estruturas metálicas. Assim, a alta sensibilidade dos nêutrons na detecção de hidrogênio aliada à alta probabilidade que os produtos de corrosão sejam ricos em hidrogênio constituem a base para implementar o método neutrongráfico de detecção de corrosão em estruturas de alumínio. Os objetos de teste empregados foram construídos na liga de alumínio AA 7075 e o agente contrastante utilizado foi o hidróxido de alumínio, $\text{Al}(\text{OH})_3$, que é o principal constituinte dos produtos de corrosão do alumínio [Crispim et al. (1993)].

3.1. Neutrongrafias digitalizadas pelo scanner

Na Figura 6(a), encontra-se representado um indicador de sensibilidade neutrongráfica para detecção de corrosão oculta em alumínio. Esse indicador consiste de quatro conjuntos de cavidades de 1,0 mm; 2,0 mm; 4,0 mm e; 10,0 mm de diâmetro numa peça de alumínio AA7075, com 10 mm de espessura e área de 60 × 80 mm, sendo que cada conjunto de cavidades é composto por dez cavidades cujas profundidades são 100 μm (1), 500 μm (2); 1,0 mm (3); 2,0 mm (4); 3,0 mm (5); 4,0 mm (6); 5,0 mm (7); 6,0 mm (8); 7,0 mm (9) e; 8,0 mm (10) (os números entre parênteses correspondem à numeração das cavidades na FIG. 21(c)), preenchidas com hidróxido de alumínio, $\text{Al}(\text{OH})_3$, principal constituinte dos produtos de corrosão do alumínio. Esse indicador é utilizado para avaliar a sensibilidade da radiografia com nêutrons na detecção de corrosão em estruturas de alumínio [CRISPIM *et al.* (1993)]. A partir dessa imagem, deseja-se determinar o contraste mínimo observável, por meio do realce das cavidades e da medição de seus atributos geométricos. A Figura 6(b) representa o padrão de iluminação durante a digitalização.

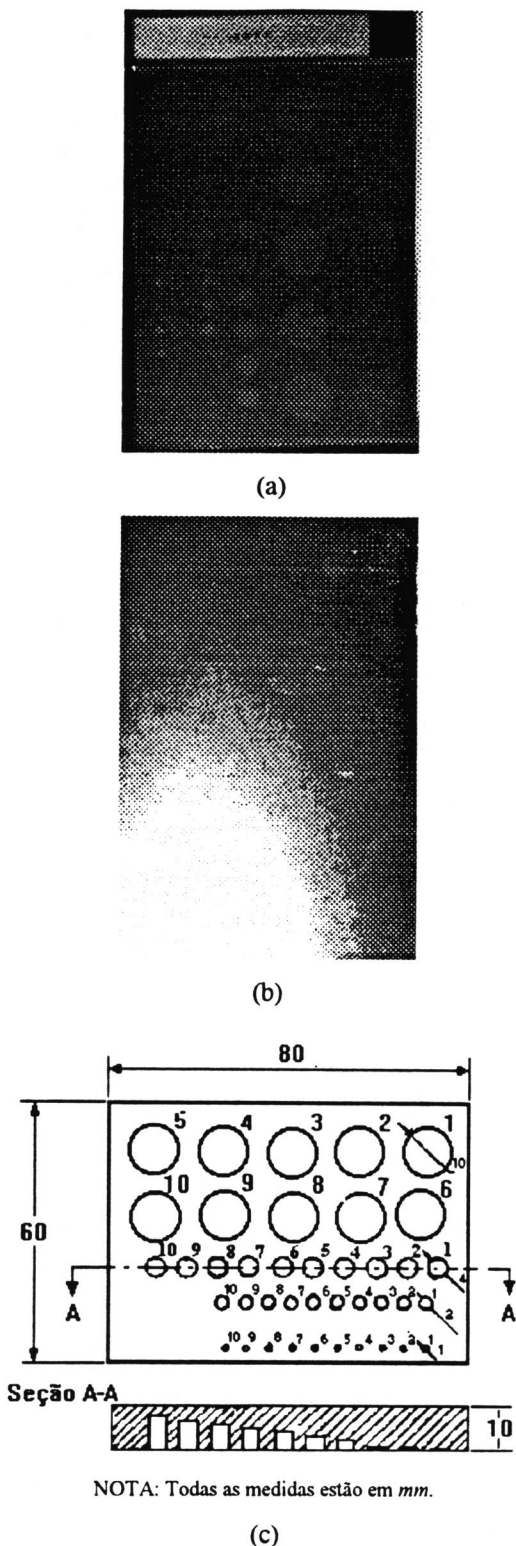


FIGURA 6: (a) Indicador de sensibilidade; (b) Padrão de iluminação; (c) Desenho do indicador. FONTE: CRISPIM, 1993, p. 100.

A Figura 7 mostra a imagem processada do indicador de contraste. As operações de PDI aplicadas foram: correção da iluminação, filtragem espacial (SSDA), limiarização variável (para segmentação das cavidades), fatiamento de nível (para isolamento das cavidades), soma com a imagem original e suavização das bordas (filtro da mediana). Na Tabela 1, encontram-se os resultados da segmentação e da medição automática e manual dos diâmetros das cavidades. Foi possível visualizar os orifícios de 1 mm de diâmetro até 3 mm de profundidade, todavia as medidas manuais e automáticas dos diâmetros apresentaram desvios médios de 50 % com relação à medida real. Os orifícios de 2 mm de diâmetro foram visualizados até 4 mm de profundidade, sendo que as medidas manuais e automáticas dos diâmetros apresentaram desvios médios de 13 e 18 %, respectivamente. Os orifícios de 4 mm de diâmetro foram visualizados até 2 mm de profundidade e as medidas dos diâmetros tiveram desvios médios de 16,6 e 4,6 %, para as medições automática e manual, respectivamente. Por fim, os orifícios de 10 mm de diâmetro foram visualizados até 3 mm de profundidade, apresentando desvios médios para as medições manual e automática de 1,5 e 3,2 %, respectivamente. Essa diminuição progressiva no desvio apresentado pelas medições, à medida que se opera sobre os orifícios de maior diâmetro, deve-se ao afastamento do limite de resolução espacial inerente ao sistema radiográfico.

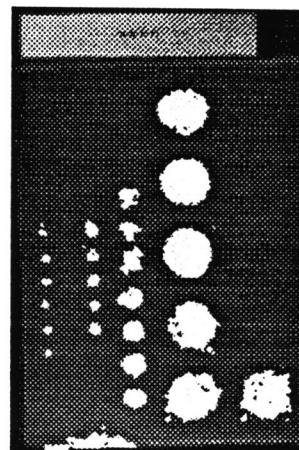


Figura 7: Indicador de contraste após processamento.

A Figura 8(a) mostra um Indicador de Resolução Visual (IRV) para avaliação do contraste observável em radiografias com nêutrons, que consiste de duas cavidades de 8,0 e 10,0 mm de diâmetro numa chapa de alumínio, sendo que a cavidade de 10,0 mm foi preenchida com $Al(OH)_3$ e a cavidade de 8,0 mm foi

mantida vazia. Aqui, deseja-se o realce da cavidade vazia, o realce das bordas e o dimensionamento das duas cavidades. O perfil de iluminação durante a digitalização é mostrado na Figura 8(b).

Tabela 1

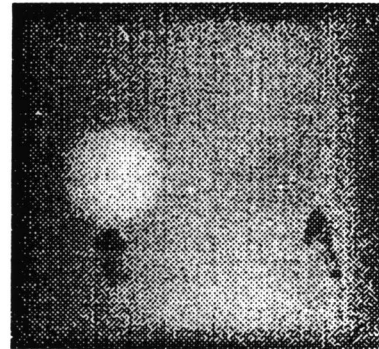
Resultado da segmentação do indicador de contraste

Profundidade	Diâmetros (1)								
	$\phi = 1,0$		$\phi = 2,0$		$\phi = 4,0$		$\phi = 10,0$		
	A	M	A	M	A	M	A	M	
0,100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,500	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-	4,0	4,2	-	-	-
3,0	1,3	1,5	-	-	3,9	4,1	10,4	10,0	
4,0	1,6	1,4	2,8	2,2	5,0	4,2	10,2	10,2	
5,0	1,5	1,3	2,2	2,4	4,9	4,2	10,0	10,2	
6,0	1,5	1,5	2,4	2,3	4,4	4,1	10,2	9,9	
7,0	1,6	1,6	1,9	1,9	5,0	4,2	10,2	9,9	
8,0	1,5	1,3	2,3	2,3	4,4	4,3	10,9	10,3	

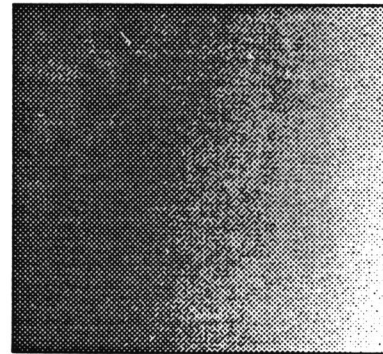
NOTA: (1) Todas as medidas estão em mm. (2) A - Medição automática; M - Medição manual.

Na Figura 9, é mostrada a imagem processada do IRV. As operações de PDI aplicadas foram: expansão de contraste, filtragem *noise cheating*, filtragem espacial (filtro da mediana), expansão de contraste (para realce das cavidades), segmentação das cavidades, suavização das bordas das cavidades (filtro da mediana), fatiamento de nível (para isolamento das cavidades) e soma com a imagem original. Neste caso, não foi aplicada a operação de correção da iluminação porque foi obtido um melhor resultado sem o seu emprego. Na Tabela 2, encontram-se os resultados da segmentação e da medição automática e manual das dimensões das cavidades. A medida automática da cavidade vazia, que não teve a sua forma original restaurada (circular), corresponde à média dos seguintes valores fornecidos pelo analisador: altura máxima, largura máxima e diâmetro equivalente, enquanto que a medida manual corresponde à média de

quatro valores: altura, largura e duas diagonais. O desvio máximo encontrado nas medições foi de 3,75 %.



(a)



(b)

Figura 8: (a) IRV em alumínio; (b) Padrão de iluminação.

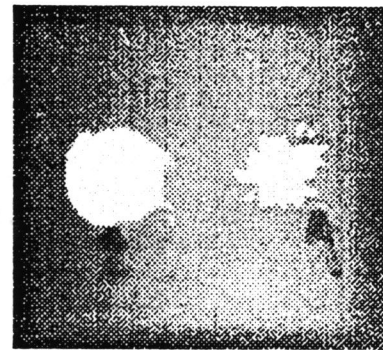


Figura 9: IRV em alumínio após processamento.

3.2. Neutronografias digitalizadas pela câmara CCD

Na Figura 10(a), encontra-se a imagem de uma peça de alumínio que sofreu os efeitos de corrosão por esfoliação. Deseja-se realçar as regiões onde ocorreu corrosão. A Figura 10(b) mostra a imagem processada da região com corrosão. As operações de PDI aplicadas

foram: limiarização variável (para segmentação das regiões), expansão de contraste e suavização (filtro da mediana). Aqui, foram apresentadas apenas imagens de um quadro por não se observar uma diferença significativa nos resultados obtidos a partir de imagens de 100 quadros.

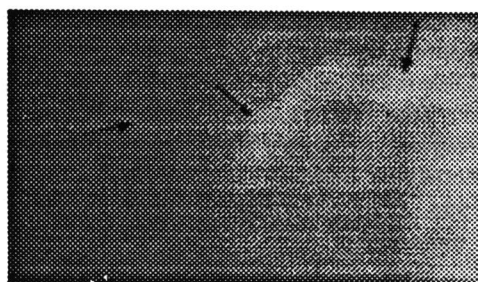
deterioração). Neste caso, como não foi observada uma diferença significativa no resultado obtido entre imagens digitalizadas com um quadro e com 100 quadros, foram apresentados apenas os resultados relativos a imagens de um quadro.

Tabela 2

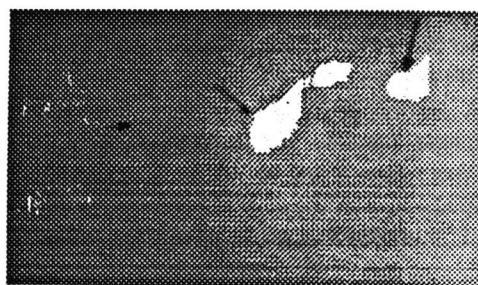
Dimensionamento das cavidades do IRV em alumínio

Cavidade	Medida Real	Medida Automática	Medida Manual
Vazia	8,0	8,2	8,3
Preenchida com Al(OH) ₃	10,0	10,3	10,0

NOTA: Todas as medidas estão em mm.



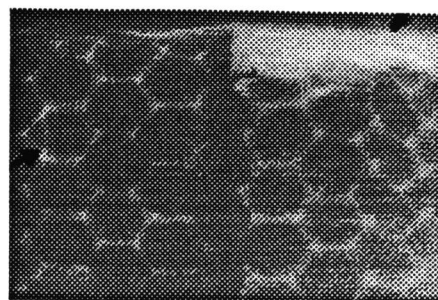
(a)



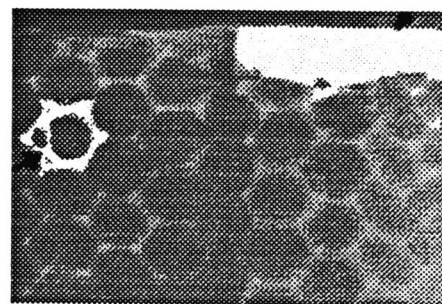
(b)

Figura 10: placa de alumínio esfoliada (um quadro): (a) original; (b) processada. As setas indicam as regiões onde a corrosão foi mais acentuada.

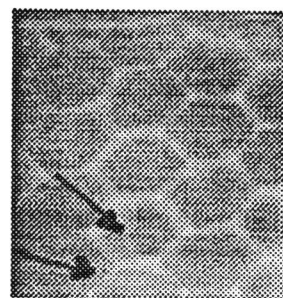
As Figuras 11(a) e (c) mostram duas amostras de uma estrutura de aeronave do tipo colméia construídas em alumínio e madeira. Deseja-se o realce das regiões onde se verifica corrosão do alumínio e apodrecimento da madeira. Nas Figuras 11(b) e (d) são mostradas as mesmas imagens após serem processadas. As operações de PDI aplicadas foram: filtragem *noise cheating* e limiarização (para segmentação das áreas que sofreram



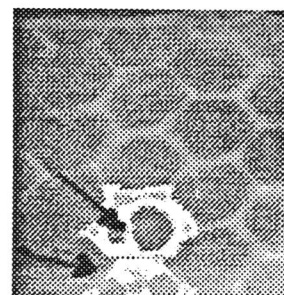
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 11: estrutura de aeronave do tipo colméia (um quadro): (a) e (c) Originais; (b) e (d) Processadas. As setas nas imagens indicam as áreas deterioradas.

4. Comentários Finais

A neutrongrafia possui um amplo espectro de aplicações como método de ensaio não destrutivo, tendo sido aplicada em diversas áreas, como indústrias nuclear e convencional, biologia, metalurgia, arqueologia e inspeção de explosivos [Dias-Araújo (1993)].

A capacidade de inspeção da neutrongrafia para detectar corrosão em superfícies é praticamente insensível às variações na espessura da base metálica. Estruturas de alumínio de vários centímetros de espessura podem ser facilmente inspecionadas mesmo quando a superfície encontra-se revestida com alguns centímetros de material espalhador de nêutrons.

A definição dos limiares utilizados na segmentação das imagens é bastante crítica e subjetiva e, aliada à imprecisão característica na definição das bordas em imagens radiográficas com nêutrons, devida ao espalhamento que ocorre na interação dos nêutrons e dos núcleos dos materiais, contribui para os desvios observados entre as medições (automática e manual) e o valor real. Esse problema pode ser contornado pela utilização de uma função automática de reconhecimento de bordas, como a LSF (*Line Spread Function*) [Harms et al. (1972)].

A grande vantagem de se utilizar um sistema digital de análise de imagens, quando comparado com o método convencional (análise visual por parte do usuário), reside no fato de ser possível a segmentação e o dimensionamento automático de componentes presentes nas imagens radiográficas, produzindo resultados menos subjetivos e menos dependentes do usuário.

O analisador NEUTRA tem produzido bons resultados a partir de imagens registradas em filmes radiográficos. Todavia, na inspeção de componentes de aeronaves, é desejável o emprego de um sistema de *imageamento* portátil e capaz de realizar os ensaios em tempo-real, a fim de suprimir as etapas de digitalização dos filmes, aumentando a eficiência da neutrongrafia como método de ensaio.

Referências

- A. de A. Araújo. Sum of absolute gray level differences: an edge preserving smoothing approach. *Electronic Letters*, v. 21, n. 25-26, p. 1219-1220, Dec. 1985.
- H. Berger. *Neutron radiography; methods, capabilities, and applications*. Amsterdam: Elsevier Publishing Co., 1965. 146p.
- V. R. Crispim. *Desenvolvimento de ensaios não-destrutivos usando radiografia com nêutrons*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1993. p. 82-84, 99-101. (Tese, Doutorado em Engenharia Nuclear e Planejamento Energético).
- V. R. Crispim, J. J. G. da Silva, J. C. Borges. Aluminum corrosion detection by neutron radiography. In: ENCONTRO NACIONAL DE APLICAÇÕES NUCLEARES, 2, 1993, Caxambu. *Anais...* São Paulo: ABEN, 1993. p. 137-138.
- C. A. Davis Jr. *PixelWare: um sistema de processamento digital de imagens*. Belo Horizonte: Instituto de Ciências Exatas da UFMG, 1992. 89p. (Dissertação, Mestrado em Ciência da Computação).
- A. F. Dias. NEUTRA: *um sistema para análise de imagens radiográficas com nêutrons*. Belo Horizonte: Instituto de Ciências Exatas da UFMG, 1994. 179p. (Dissertação, Mestrado em Ciência da Computação).
- A. F. Dias, A. de A. Araújo. Análise de imagens obtidas por radiografia com nêutrons. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 6, 1993, Recife. *Anais...* Comunicações. Rio de Janeiro: SBC, UFPe, 1993. p. 87-90.
- A. A. Harms, B. K. Garside, P. S. W. Chan. The edge-spread function in neutron radiography. *J. Appl. Phys.*, New York, v. 43, n. 9, p. 3863-3867, Sept. 1972.
- A. K. Jain. *Fundamentals of digital image processing*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall International, 1989. 569p.
- W. K. Pratt. *Digital image processing*. New York: John Wiley & Sons, 1978. 750p.