



## APLICAÇÃO DA RADIOGRAFIA DIGITAL COM FLAT PANEL NA ARQUEOMETRIA

Soraia Rodrigues de Azeredo

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro  
Junho de 2016

APLICAÇÃO DA RADIOGRAFIA DIGITAL COM FLAT PANEL NA  
ARQUEOMETRIA

Soraia Rodrigues de Azeredo

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

---

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.

---

Prof. Delson Braz, D.Sc.

---

Prof.<sup>a</sup> Gabriela Ribeiro Pereira, D.Sc.

---

Prof. Alfredo Victor Bellido Bernedo, D.Sc.

---

Prof. Davi Ferreira de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2016

Azeredo, Soraia Rodrigues de

Aplicação da Radiografia Digital com Flat Panel na Arqueometria/Soraia Rodrigues de Azeredo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XV, 89 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 83-86.

1. Radiografia Digital. 2. Flat Panel. 3. Arqueometria. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

*Dedico este trabalho a minha mãe  
Prof.<sup>a</sup> Celia Maria e a minha irmã  
Aline Klayn.*

## Agradecimentos

A Deus, que foi sempre a minha força sobrenatural e alívio nos momentos de dor.

À minha mãe Celia Maria, que foi meu maior exemplo de profissional na área da educação e meu apoio integral neste longo caminho até o doutorado.

Ao meu orientador Prof. Ricardo Tadeu Lopes, pela orientação, paciência, por todo apoio incondicional e pela oportunidade de crescer profissionalmente.

A todos os amigos do Laboratório de Instrumentação Nuclear/COPPE/UFRJ por todo apoio.

Aos funcionários do Laboratório de Instrumentação Nuclear/COPPE/UFRJ pelo suporte incondicional para que esse trabalho pudesse ser concretizado.

Aos funcionários do Programa de Engenharia Nuclear/COPPE/UFRJ pela colaboração e suporte.

Ao CENPES/Petrobras pela oportunidade de realização deste trabalho, pelo empréstimo aos corpos de prova.

Ao Prof. Roberto Cesareo pela grande oportunidade de realização da pesquisa em arqueometria com a radiografia digital no *Museo Cao*, no Peru.

Ao *Museo Cao* (Trujillo, Peru), em nome da Dra. Gioconda Arabel F. Lopes, pela oportunidade da pesquisa com os materiais arqueológicos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## APLICAÇÃO DA RADIOGRAFIA DIGITAL COM FLAT PANEL NA ARQUEOMETRIA

Soraia Rodrigues de Azeredo

Junho/2016

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho foram realizadas análises de peças metalúrgicas arqueológicas por radiografia digital com *flat panel*, da civilização Moche do Peru ( $\approx 300-400$  d.C.), que apresentam soldagens entre placas de ligas de ouro e prata. Desta maneira, o objetivo da presente pesquisa foi realizar uma análise investigativa das tecnologias de soldagens implementadas entre estas ligas. A técnica de radiografia digital com *flat panel* foi escolhida por ser um ensaio não destrutivo, método inovador neste tipo de análise arqueológica e pela facilidade no processo de inspeção. Foram elaborados e efetuados testes de caracterização do sensor *flat panel* e realizadas as aquisições radiográficas das peças decorativas arqueológicas. Os resultados dos testes de caracterização mostraram o desempenho do sensor quanto à sua resolução espacial básica, função de transferência de modulação, sensibilidade ao contraste, faixa de espessura do material e eficiência. Enquanto que, as análises radiográficas das peças arqueológicas indicaram evidências sobre os tipos de técnicas de soldagem de ligas metálicas de ouro e prata utilizados pela civilização Moche.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DIGITAL RADIOGRAPHY APPLICATION WITH FLAT PANEL IN  
ARCHEOMETRY

Soraia Rodrigues de Azeredo

June/2016

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

In this work archaeological metallurgical objects analysis were performed by digital radiography with flat panel of the Moche civilization from Peru (dated around third-fourth century A.D.) which present welding between silver and gold alloys sheets. Thus, the aim of this research was to perform an investigative analysis of the welding technology implemented between these alloys sheets. The digital radiography technique with flat panel was chosen because it is a non-destructive test, innovative method in this type of archaeological analysis and for facility in inspection process. Characterization testing were developed and realized of the flat panel sensor and then radiographs these archaeological objects were acquired. The results of characterization testing showed about performance in basic spatial resolution, modulation transfer function, contrast sensitivity, material thickness range and efficiency. While the radiographic analysis indicated evidences about the welding technique of the silver and gold metals alloys sheets used for Moche civilization.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Radiografia Digital com <i>Flat Panel</i>	6
2.1.1 Imagem Digital	7
2.1.2 Estrutura de um Flat Panel (Digital Detector Array - DDA)	8
2.1.3 Métodos de Digitalização	11
2.1.4 Componente Específico - Cintilador	12
2.1.5 Componente Específico - Semicondutores (Fotocondutores)	14
2.1.6 Captura de Conversão de Imagem - Dispositivos de Carga Acoplada	15
2.1.7 Estruturas de Leitura CMOS	15
2.1.8 Estruturas de Leitura de Silício Amorfo	16
2.1.9 Escolha da Estrutura de Leitura	17
2.1.10 Tamanho de Pixel	18
2.1.11 Níveis de Cinza	18
2.1.12 Propriedades	19
2.1.13 Sinal e Ruído	20
2.1.14 Resolução Espacial Básica	21
2.1.15 Relação Sinal-Ruído	27
2.1.16 Eficiência	29
2.1.17 Lag	30
2.1.18 Pixels Defeituosos	31
2.1.19 Sensibilidade ao Contraste	31
2.1.20 Faixa de Espessura do Material Específico	33
2.1.20 Calibrações - Correção de Ganho e Offset	33
2.1.21 Seleção de um DDA para Ensaios Não Destrutivos	33
2.1.22 Qualidade da Imagem Digital	34
2.2 Metalurgia Moche	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Materiais	39
3.1.1 Testes de Caracterização do Sistema Radiográfico	39

3.1.2 Ensaio Radiográfico das Peças Arqueológicas	40
3.2 Métodos	41
3.2.1 Testes de Caracterização do do Sistema Radiográfico	41
3.2.2 Ensaio Radiográfico das Peças Arqueológicas	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 Resultados dos Testes de Caracterização do do Sistema Radiográfico	49
4.1.1 Resolução Espacial Básica (SRb)	49
4.1.2 Função Transferência de Modulação (MTF)	49
4.1.3 Sensibilidade ao Contraste (CS)	50
4.1.4 Faixa de Espessura do Material (MTR)	52
4.1.5 Eficiência	52
4.2 Análises das Imagens Radiográficas das Peças Decorativas Arqueológicas	53
4.2.1 Peça Decorativa PD01	54
4.2.2 Peça Decorativa PD02	58
4.2.3 Peça Decorativa PD03	60
4.2.4 Peça Decorativa PD04	63
4.2.5 Peça Decorativa PD05	65
4.2.6 Peça Decorativa PD06	69
4.2.7 Peça decorativa PD07	72
4.2.8 Peça decorativa PD08	75
4.2.9 Peça decorativa PD09	78
4.2.10 Peça decorativa PD10	79
5 CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
ANEXO	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de uma técnica radiográfica digital com detector flat panel (MOREIRA et al., 2007). .....	6
Figura 2.2. Representação da relação dos valores de pixels e as tonalidades de cinza obtidas (CORREA, 2009). .....	7
Figura 2.3. Representação esquemática do processo de aquisição de uma imagem digital: (a) objeto (elemento da cena) com uma fonte de radiação incidindo sobre ele; (b) sistema de imagem (DDA); (c) plano da imagem latente (matriz de sensores) e (d) imagem digitalizada (GONZALEZ & WOODS, 2002). .....	8
Figura 2.4. (a) Sensor único de imagem. (b) Linha de sensores. (c) Matriz de sensores (GONZALEZ & WOODS, 2002). .....	9
Figura 2.5. Desenho ilustrativo da estrutura de um DDA de conversão indireta (ASTM E2736-10). .....	9
Figura 2.6. Diagrama básico de um sistema de imagem digital com raios X (ASTM E2736-10). .....	10
Figura 2.7. Representação esquemática de uma parte de um arranjo de matriz ativa de TFT (SEIBERT, 2006). .....	16
Figura 2.8. Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) de fio duplo, [a] com 13 pares de fios, para análise de resolução espacial básica da imagem (OLIVEIRA, 2010) e [b] com 15 pares de fios (fonte: <a href="http://ndtsupply.com">http://ndtsupply.com</a> ). .....	23
Figura 2.9. Imagem radiográfica do IQI de fio duplo e seu respectivo perfil de linha. .	24
Figura 2.10. Perfil de linha de um par de fios, mostrando a diferença, de pelo menos 20%, dos valores máximos e mínimos de intensidades, entre os dois fios. ....	25
Figura 2.11. Curva de MTF (MOREIRA, 2010). .....	26
Figura 2.12. A influência do ruído na visibilidade de um detalhe na radiografia: a) o detalhe é visível se a contribuição do ruído pode ser ignorada; b) o detalhe não é visível se o ruído for maior do que o contraste (EWERT, 2011). .....	28
Figura 2.13. Exemplo de gráfico para teste de eficiência com diferença de imagens a diferentes tipos de energia (ASTM E2597-07). .....	30
Figura 2.14. IQI de fio (ISO 19232-1). .....	32
Figura 2.15. IQI de furo da norma ASTM E1025-11. Apresentam três furos, correspondendo ao tamanho do diâmetro em proporção à espessura T do IQI. ....	32
Figura 2.16. Região da civilização Moche é localizada no norte do atual Peru, ao redor de Chiclayo, Trujillo e entre os Andes e o Pacífico. A tumba da “Senhora de Cao” está localizada no Complejo El Brujo (por Fundacion Wiese). .....	35
Figura 2.17. Fotos das escavações "pirâmides" (figura superior), túmulo da “Senhora de Cao” (meio) e sarcófago da “Senhora de Cao”. .....	36
Figura 3.1. [a] sensor flat panel CDR da Shick/Sirona e [b] Mini tubo de raios X. ....	39
Figura 3.2. Peças decorativas (“narigueiras”) presentes no Museo Cao, localizado no Peru. Jóias encontradas junto à tumba da “Senhora de Cao”, uma múmia da civilização Moche, de aproximadamente 100-600 d.C.	40
Figura 3.3. Sistema radiográfico para	

determinação da resolução espacial básica utilizando o IQI di fio duplo (ASTM E2002). .....	42
Figura 3.4. Sistema radiográfico para determinação da MTF utilizando uma placa de tungstênio. ....	42
Figura 3.5. Sistema radiográfico para o teste de determinação da CS utilizando o IQI de furo (ASTM E1025). ....	43
Figura 3.6. Ilustração da metodologia utilizada para determinação da CS no furo 1T e 2T do IQI (sendo T a espessura do IQI). ....	44
Figura 3.7. Ilustração do arranjo das áreas nas quais foram computadas a SNRn para o teste de avaliação da eficiência.....	45
Figura 3.8. Sistema radiográfico constituindo [a] do sensor flat panel CDR e o mini tubo de raios X; [b] com o computador integrado, para a visualização imediata da imagem radiográfica e [c] a amostra posicionada sobre o detecto, no momento de uma aquisição da imagem radiográfica digital. ....	46
Figura 4.1. Determinação da resolução espacial básica do detector flat panel através do IQI de fio duplo (ASTM E2002). ....	49
Figura 4.2. Determinação da MTF20% e MTF80%. ....	50
Figura 4.3. Determinação da MTF3% e MTF10%. ....	50
Figura 4.4. Determinação da MTR. Relação da SNR em função da espessura do material. ....	52
Figura 4.5. Determinação da eficiência, para a energia de 50 kV, pela relação da SNRn em função da variação da $\mu\text{A.s}$ (microamperagem segundo).....	53
Figura 4.6. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD01. ....	54
Figura 4.7. Imagens radiográficas da peça PD01, obtida a [a] 25 kV (para visualização da prata) e [b] 50 kV (para visualização de ouro) e [c] imagem de dupla energia, a partir das duas primeiras imagens (a e b). ....	55
Figura 4.8. [a] Imagem radiográfica do lado esquerdo superior da peça decorativa PD01, com indicações de um material intermediário entre as folhas de prata e ouro, para soldagem; [b] fotografia da peça, da região de soldagem das folhas de ouro e prata. ...	56
Figura 4.9. Imagens [a] fotográfica e [b] radiográfica da peça decorativa PD01, com filtro de aumento de detalhes. Pela radiografia é observada a presença de um material intermediário para a soldagem do escudo de sobre soldas os soldados de ouro e uma área pouco escuras nos pés. ....	57
Figura 4.10. Radiografias digitais da peça decorativa PD01 e os perfis de linha do nível de cinza por pixel das regiões destacada em [a] e [b], respectivamente. ....	58
Figura 4.11. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD02. ....	58
Figura 4.12. Imagens radiográficas do lado esquerdo superior da peça decorativa PD01, [a] sem filtro de processamento de imagem e [b] com filtro; e do lado direito inferior, [c] sem filtro de processamento de imagem e [d] com filtro. ....	59
Figura 4.13. Radiografia digital da peça decorativa PD02 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região destacada na imagem. ....	60
Figura 4.14. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD03, [a] frente e [b] verso. ....	61

Figura 4.15. Imagens radiográficas digitais da região central da peça PD03, [a] sem filtro de aumento de detalhes e [b] com filtro.	61
Figura 4.16. Imagens [a] fotográfica e [b] radiográfica da peça decorativa PD03, indicando uma camada de prata vista na fotografia, mas que não foi detectada na radiografia.	62
Figura 4.17. Radiografias digitais da peça decorativa PD03 e os perfis de linha do nível de cinza por pixel das regiões destacadas na imagem [a] do lado direito e [b] esquerdo do ornamento.	63
Figura 4.18. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD04.	64
Figura 4.19. Imagens radiográficas digitais da peça decorativa PD04, [a] mostrando a região da cabeça esquerda e [b] direita do animal; [c] região central, indicando uma área de junção prata-ouro e [d] a fotografia da peça indicando a mesma região de “c”.	64
Figura 4.20. Radiografias e perfis de linha (valor de cinza por pixel) de regiões de junções prata-ouro da peça PD04, destacadas nas imagens, [a] região central e [b] área da cabeça e corpo.	65
Figura 4.21. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD05 [a] frente e [b] verso.	66
Figura 4.22. Imagens radiográficas digitais da peça decorativa PD05. Indicadas regiões de prata e ouro e algumas descontinuidades (fissuras).	67
Figura 4.23. Radiografias e perfis de linha (valor de cinza por pixel) de regiões de junções prata-ouro da peça decorativa PD05, destacadas nas imagens, [a] região da cabeça e [b] região da “lança”.	68
Figura 4.24. Imagens radiográficas da peça PD05, adquiridas [a] a 25 kV, [b] a 50 kV e [c] imagem obtida pela técnica de dupla energia, a partir das imagens “a” e “b”.	69
Figura 4.25. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD06 [a] frente e [b] verso.	69
Figura 4.26. Imagens radiográficas da peça decorativa PD06. Indicações das regiões de interseção prata-ouro.	70
Figura 4.27. Radiografia digital da peça decorativa PD06 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.	71
Figura 4.28. Radiografia digital da peça decorativa PD06 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.	72
Figura 4.29. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD07 [a] frente e [b] verso.	72
Figura 4.30. Radiografia digital da peça decorativa PD07 [a] sem filtro e [b] com filtro de aumento de detalhes, mostrando a parte de junção entre as regiões de ouro e prata.	73
Figura 4.31. Radiografias digitais da peça decorativa PD07 adquiridas a [a] 25, [b] 40, [c] 50 kV e [d] imagem processada com as três energias anteriores.	74
Figura 4.32. Radiografia digital da peça decorativa PD07 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.	75
Figura 4.33. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD08, apresentando dois tipos de metal, prata e ouro.	76
Figura 4.34. Radiografia digital da peça decorativa PD08 e o perfil de linha do valor de cinza por pixel na região de junção prata-ouro, destacada na imagem radiográfica.	76
Figura 4.35. Radiografia digital da peça decorativa PD08 e o perfil de linha do valor de cinza por pixel na região de junção prata-ouro, destacada na imagem radiográfica,	

indicando um aumento de espessura dos dois metais ao se aproximarem da junção prata-ouro..... 77

Figura 4.36. Radiografia digital e fotografia da peça decorativa PD08, respectivamente. Na radiografia é destacada com uma linha tracejada a região de interseção prata-ouro e uma área de sobreposição dos metais..... 78

Figura 4.37. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD09, [a] frente e [b] verso. .... 78

Figura 4.38. Radiografias da peça decorativa arqueológica PD09 [a] da área central, [b] imagem radiográfica de a e [d] imagem radiográfica de b, com filtro de aumento de detalhes. .... 79

Figura 4.39. Radiografia digital da peça decorativa PD09 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem..... 79

Figura 4.40. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD10 [a] frente e [b] verso.80

Figura 4.41. Radiografia digital da peça decorativa PD10 [a] sem filtro e [b] com filtro de aumento de detalhes, mostrando a parte de junção entre as regiões de ouro e prata. 81

Figura 4.42. Radiografia digital da peça decorativa PD10 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem..... 81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Lista de propriedades de cintiladores ideais. ....	13
Tabela 2.2. Propriedades inerentes do DDA. ....	19
Tabela 2.3. Valores dos Parâmetros do IQI de fio duplo.....	24
Tabela 3.1. Composição de áreas de Au das peças decorativas .....	41
Tabela 4.1. Valores obtidos da sensibilidade ao contraste (CS).....	51
Tabela 4.2. Determinação da visibilidade dos furos.....	52

## LISTA DE SIGLAS

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CCD</b>	Charge-Coupled Devices
<b>CMOS</b>	Complementary Metal Oxide Semiconductor
<b>CS</b>	Contrast Sensitivity
<b>DDA</b>	Digital Detector Array
<b>EDXRF</b>	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence
<b>IP</b>	Imaging Plate
<b>IQI</b>	Image Quality Indicator
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>MTF</b>	Modulation Transfer Function
<b>MTR</b>	Material Thickness Range
<b>RC</b>	Radiografía Convencional
<b>RD</b>	Radiografía Digital
<b>SMTR</b>	Specific Material Thickness Range
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>SNR<sub>n</sub></b>	Signal-to-NoiseRatio Normalized
<b>SR<sub>b</sub></b>	Spatial Resolution Basic
<b>TFT</b>	Thin Film Transistor

# 1 INTRODUÇÃO

A técnica radiográfica é um ensaio não destrutivo de aquisição de imagem de um material, para inspeção de sua estrutura interna. Essa técnica baseia-se na emissão de radiação (geralmente fontes de raios X ou gama) sobre o objeto e posteriormente detecção do feixe de radiação transmitido através do material. A imagem obtida é resultado de um percentual do feixe de radiação incidente que atravessa o material (feixe transmitido) e é detectado por um filme radiográfico ou detector digital. Esse feixe transmitido depende do grau de atenuação sofrido na interação com a matéria, que por sua vez é dependente de vários fatores, tais como: da densidade e/ou espessura do material, energia da radiação incidente. Desta maneira, a radiografia pode ser definida como um registro visual da estrutura interna de um material, como um mapa de densidades e/ou espessuras de materiais expostos à radiação.

A radiografia convencional foi a primeira técnica de formação de imagem de materiais a partir da exposição à radiação penetrante. A radiografia convencional baseia-se na aquisição de imagem analógica por um filme radiográfico, formado por cristais de halogenados de prata, o qual após a exposição à radiação passa por um processo de revelação química até a obtenção da imagem final. Por muitos anos a radiografia convencional foi bastante utilizada desde primeira radiografia apresentada em público em 1896 (meses após a descoberta dos raios X pelo físico alemão Wilhelm Conrad Rontgen, 1895), na Sociedade de Física Médica de Wurzburg, pelo próprio Rontgen. Em fevereiro de 1896, Rontgen realizou uma radiografia de um braço fraturado e enviou ao *British Medical Journal* para provar o extraordinário poder diagnóstico de sua descoberta.

Porém atualmente existe a radiografia digital, que é caracterizada por dois tipos, onde ambos produzem imagens digitais, mas geralmente recebem denominações diferentes devido a técnica de aquisição de imagem ser distinta: a radiografia computadorizada (RC) e a digital (RD). A radiografia computadorizada (RC) que utiliza um filme flexível, denominado de *imaging plate* (IP), conhecido como placa de fósforos

fotoestimuláveis (PSP – *photostimulable phosphor*) (SEERAM, 2011), geralmente haletos de flúor bário dopado com európio (BaFBr:Eu ou BaFI:Eu), sendo a função do európio (Eu) servir de ativador no cristal para que haja a luminescência fotoestimulável (BUSHONG, 2010), formando uma imagem latente e que após a exposição à radiação é digitalizada por um equipamento do tipo *scanner* e a radiografia digital (RD), que utiliza um detector rígido denominado de *Digital Detector Array* (DDA), conhecido também como *flat panel* (painel plano) que se caracteriza por um arranjo de sensores sensíveis à radiação, um sistema capaz de produzir uma imagem radiográfica digital imediatamente após a exposição do material à radiação, visualizada diretamente na tela de um computador (CARTER & VEALE, 2014).

As primeiras imagens radiográficas digitais produzidas foram realizadas através da conversão via leitores "*scanners*" ou câmeras de vídeo, sendo o processo de conversão de mídia física para digital no seu início caro e difícil de ser realizado (WATANABE *et al.*, 1999). A mais recente técnica de imagem digital (utilizando *flat panel*) tem como um fator positivo a qualidade da imagem, facilidade no seu processamento de aquisição da imagem, levando menor tempo de formação da imagem e facilidade no tratamento da imagem.

Uma grande vantagem das imagens digitais é a manipulação da mesma após produzida, isto é, alguns parâmetros podem ser corrigidos, após a imagem ter sido adquirida. Pode ser realizado, por exemplo, uma correção de uma alta ou baixa exposição da imagem e, assim, evitar a necessidade de uma nova exposição. Outra opção é ser possível ajustar o contraste para melhorar o reconhecimento de áreas específicas, aumentando a facilidade de perceber pequenos detalhes. Assim, um inspetor devidamente qualificado pode obter muito mais quantidades de informações de um objeto inspecionado com o sistema digital em relação ao analógico. Além do mais, considerando melhores condições de exposição, a radiologia digital ainda pode ser aplicada a uma larga área de aplicações de raios X, incluindo inspeção de soldas de tubos, eletrônicos, rodas, trilhos, pontes, materiais arqueológicos, obras de artes de museus e muitos outros usos. A tecnologia digital vem sendo adaptada dia a dia e tem agregado muitas melhorias, tanto na qualidade da imagem, na rapidez dos laudos, como

na redução das doses de radiação recebidas pelos operadores, etc. Outro fator importante é que os DDAs podem ser utilizados para detectar diferentes tipos de formas de radiação eletromagnética, ou partículas, incluindo raios gama, nêutrons ou outras formas de radiação penetrante (ASTM E2736-10), não somente os raios X.

Nos últimos anos estudos vem sendo realizados (EWERT *et al.*, 2008, 2011 e 2012) na área de ensaios não destrutivos, com o sistema DDA e a sua possibilidade da substituição da radiografia com filme convencional. Estes sistemas podem ser superiores quanto a sensibilidade ao contraste e a relação sinal-ruído (SNR - *signal-to-noise ratio*), em comparação com os sistemas de filmes (EWERT *et al.*, 2007), mas são limitados pela baixa resolução espacial básica (SRb - *spatial resolution basic*). É importante destacar que a relação sinal-ruído (SNR) é um dos parâmetros de qualidade da imagem que é característico da radiografia digital (RC com IP e com DDA), mas pode ser considerado um equivalente à densidade óptica da radiografia com filme convencional (EWERT *et al.*, 2011).

Normas relacionadas a detectores digitais do tipo *flat panel*, foram atualmente elaboradas: ASTM E2597 (2007), sobre práticas para caracterização de DDAs; ASTM E2698 (2010), sobre práticas de exames radiológicos usando DDAs; ASTM E2736 (2010), sobre guia para DDAs radiológicos e ASTM E2737 (2010); sobre práticas para avaliação da performance e estabilidade em longo tempo de DDAs e ISO 17636-2 (2013), sobre ensaios não destrutivos de soldas - testes radiográficos com detectores digitais. As normas ASTM E2597 e ASTM E2737, apresentam práticas importantes para obter informações sobre um determinado sistema DDA.

A radiografia digital é um ensaio não destrutivo crescente recentemente na área arqueológica, principalmente para a análise estrutural e investigação de objetos (LIMA *et al.*, 2011, CUEVAS *et al.*, 2011, PEREA *et al.*, 2012, CALZA *et al.*, 2015, PETAROS *et al.*, 2015). Nos últimos anos, a radiografia digital com detector *flat panel*, está sendo uma técnica bastante requerida na arqueometria (FIGUEIREDO *et al.*, 2011, DEWANCKELE *et al.*, 2013, MANNESA *et al.*, 2014 e CESAREO *et al.*, 2016). Uma

grande pesquisa tem sido feita, por exemplo, em objetos arqueológicos de civilizações antigas do Peru. Uma dessas é a civilização Moche, da qual neste trabalho foram analisados alguns objetos.

O Moche (ou Mochica) civilização que surgiu no norte do Peru, nos vales Moche e Chicama, onde seus grandes centros cerimoniais foram descobertos, de cerca de 100 a.C. a 600d.C., com produções de belos tecidos, cerâmicas pintadas e monumentos de enfeites de ouro e prata. A cultura pré-colombiana Moche é caracterizada por uma grande habilidade metalúrgica, de modo que eles são considerados os melhores produtores de joias e artefatos da região. Esta capacidade foi impressionantemente demonstrada pelas escavações das "*Tumbas Reales de Sipán*" (ALVA *et al.*, 1993 e 2004) descobertas por Walter Alva em 1987 e no túmulo da "Senhora de Cao" descoberto por Regulo Franco em 2005 (JORDAN *et al.*, 2008, 2009, 2010 e 2011). Em particular, as ligas metálicas do túmulo de a "Senhora de Cao", datado por volta de 300 d.C., são caracterizadas por uma impressionante variedade de ligas metalúrgicas: entre os 120 objetos, principalmente joias (todas como decorações de nariz), aparentemente obtidas pela combinação de folhas de ligas de ouro e prata. Alguns desses ornamentos foram obtidos por colagem de uma folha de prata sobre uma de ouro, outros por soldagem das folhas de ligas de ouro com as de prata.

A radiografia digital utilizando um sensor *flat panel*, que gera a imagem radiográfica imediatamente no *display* de um computador, permitindo a avaliação instantânea do objeto, é um fator muito positivo e inovador na área arqueológica. Trabalhos de análise e/ou estudos de peças arqueológicas já foram realizados, porém geralmente com a radiografia de filme, que tem a desvantagem do tempo, tanto de exposição quanto do processo de revelação do filme (LIMA, 2010).

A motivação deste trabalho é a crescente substituição da radiografia digital convencional (de filme) pela radiografia digital utilizando *imaging plate (IP)* ou *flat panel* (também denominado de DDA - *Digital Detector Array*) e essa troca vem aparecendo em várias áreas, tais como: médica, industrial, arqueológica, etc. A

radiografia digital com *flat panel*, vem ganhando ainda mais destaque devido fatores de qualidade da imagem superiores, maior facilidade no processo de aquisição da imagem e possibilidade de manipulação da imagem após a aquisição.

O objetivo desta pesquisa foi obter informações sobre a tecnologia de soldagem entre ligas de ouro e prata, implementada pela civilização Moche, especificamente na confecção dos ornamentos de nariz da “Senhora de Cao”. A técnica de radiografia digital com *flat panel* foi escolhida, por ser um ensaio não destrutivo, inovadora neste tipo de análise arqueológica e pela facilidade de operação da inspeção (menor tempo de inspeção, sistema compacto, qualidade da imagem superior em relação à radiografia convencional e até mesmo da radiografia computadorizada- com uso de *imaging plate*). Com a radiografia digital torna-se possível uma análise investigativa da estrutura das peças e para assim obter evidências da forma de manufatura dessas joias pela civilização Moche.

No Capítulo 2, será apresentado um breve conceito sobre a radiografia digital, destacando alguns conceitos como a imagem digital e sobre as características físicas do DDA (estrutura, princípio de funcionamento, propriedades, processamento da imagem) e fatores sobre a qualidade da imagem digital. Também será relatado um breve histórico da civilização Moche e sua rica confecção de joias utilizando ligas metálicas de ouro e prata.

No Capítulo 3 serão descritos os materiais e procedimentos experimentais utilizados para a realização desta pesquisa.

No Capítulo 4 e 5 serão apresentados os resultados com as devidas discussões e conclusões desta pesquisa, respectivamente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Radiografia Digital com *Flat Panel*

A definição básica para a radiografia digital (RD) com *flat panel* é um sistema de produção de imagens digitais a partir da exposição de um material à radiação (geralmente raios X e gama) e captura do feixe transmitido (que atravessa o material) pelo detector plano (*flat panel*). O detector transforma a energia absorvida da radiação em sinal elétrico, que posteriormente é transformado em sinal digital através de um conversor A/D e, assim, a imagem é visualizada imediatamente após a aquisição na tela de um computador. (Figura 2.1). A estrutura de um detector *flat panel* pode variar bastante, principalmente na forma de captura e conversão da energia da radiação, na estrutura de leitura e na eletrônica envolvida. Nas seções mais adiante serão explicados um pouco sobre partes da estrutura de um DDA e suas variantes.

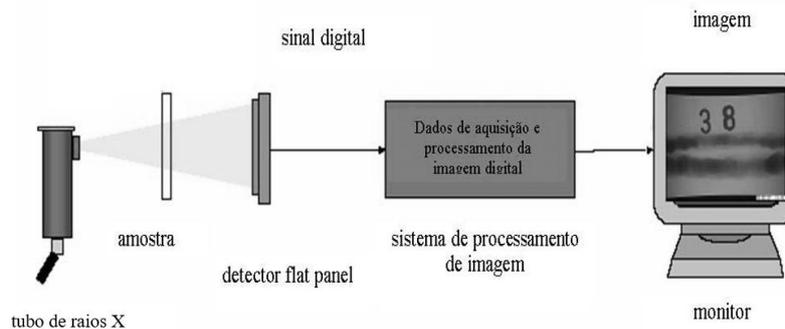


Figura 2.1. Esquema de uma técnica radiográfica digital com detector *flat panel* (MOREIRA et al., 2007).

### 2.1.1 Imagem Digital

A imagem digital é caracterizada pelos chamados binários, que são dígitos que assumem os valores de 0 ou 1. Estes dígitos binários são geralmente denominados de bits e o conjunto desses, de bytes. Os bits e bytes são representações de *pixels* de uma imagem digital. Como uma sequência combinatória dos binários, formam-se diferentes configurações de bytes representando as diversas tonalidades de grau de cinza nos *pixels*. A Figura 2.2 mostra a relação entre as configurações de bytes, valores de *pixel* e tonalidades de cinza (MARCHAND-MAILLET & SHARAIHA, 2005, CORREA, 2009).

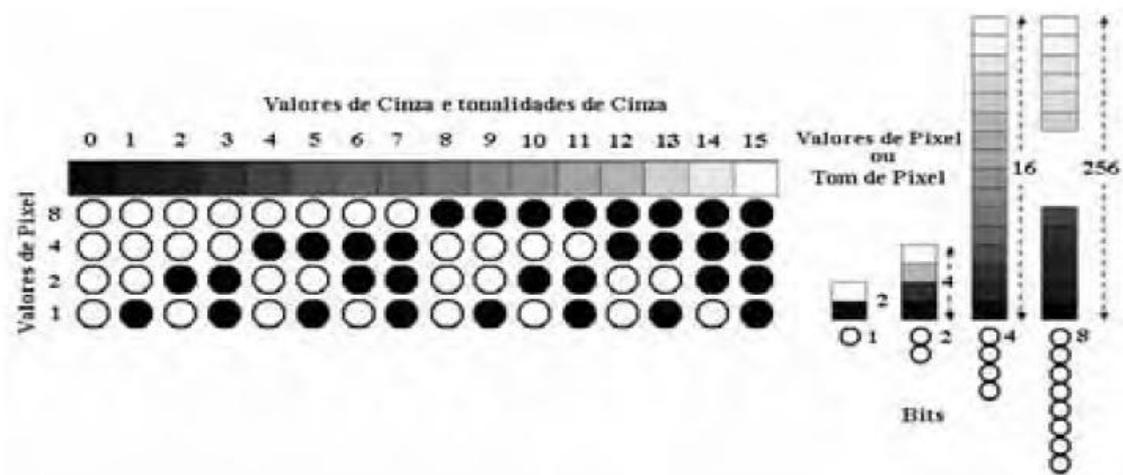


Figura 2.2. Representação da relação dos valores de pixels e as tonalidades de cinza obtidas (CORREA, 2009).

O número de tons de cinza é determinado por uma potência do tipo  $2^n$ , onde  $n$  representa o número de bits. Os mais comuns são  $2^8$  (256 níveis de cinza),  $2^{12}$  (4096 níveis de cinza),  $2^{14}$  (16384 níveis de cinza) e  $2^{16}$  (65536 níveis de cinza). Não necessariamente as imagens digitais atingirão estes valores de cinza, representam somente o máximo que podem atingir.

Detectores digitais, por exemplo, são estruturados na forma de matriz 2D de sensores, onde cada unidade representa um *pixel* na imagem digital (Figura 2.3). A resposta de cada sensor é proporcional a energia da radiação que atinge a sua superfície e é capturada.

Um objeto é irradiado por um feixe de uma fonte de radiação (Figura 2.3-a), sendo que a primeira operação executada pelo sistema de radiográfico digital, é a captura da energia pela matriz de sensores (Figura 2.3-b), produzindo a imagem latente matricial (Figura 2.3-c) e na sequência, obtém-se a saída de uma imagem digital (Figura 2.3-d) (GONZALEZ & WOODS, 2002).

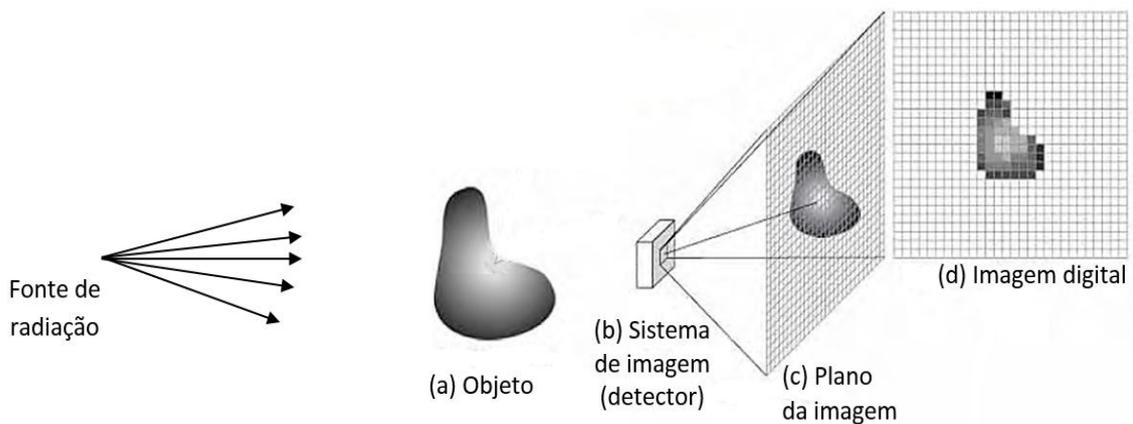


Figura 2.3. Representação esquemática do processo de aquisição de uma imagem digital: (a) objeto (elemento da cena) com uma fonte de radiação incidindo sobre ele; (b) sistema de imagem (DDA); (c) plano da imagem latente (matriz de sensores) e (d) imagem digitalizada (GONZALEZ & WOODS, 2002).

### 2.1.2 Estrutura de um *Flat Panel* (Digital Detector Array - DDA)

A base da estrutura de um *flat panel* são os sensores discretos, dispostos como uma matriz, onde ocorre a captação de dados de cada uma destas partes discretas

(Figura 2.4-a), que é ligada a uma estrutura de leitura para formar *pixels* de um arquivo de imagem digital (Figura 2.4 e 2.5). A Figura 2.6 mostra um diagrama de um típico sistema de imagem digital.

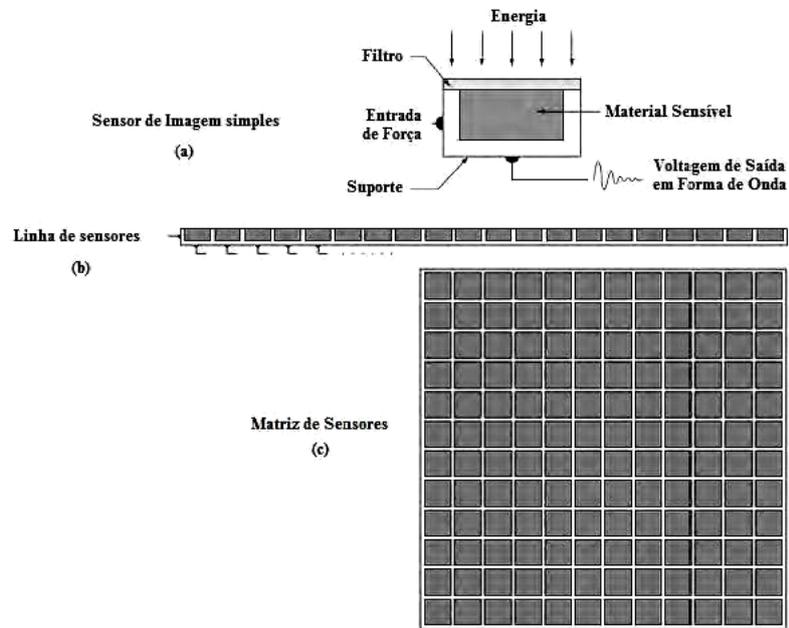


Figura 2.4. (a) Sensor único de imagem. (b) Linha de sensores. (c) Matriz de sensores (GONZALEZ & WOODS, 2002).

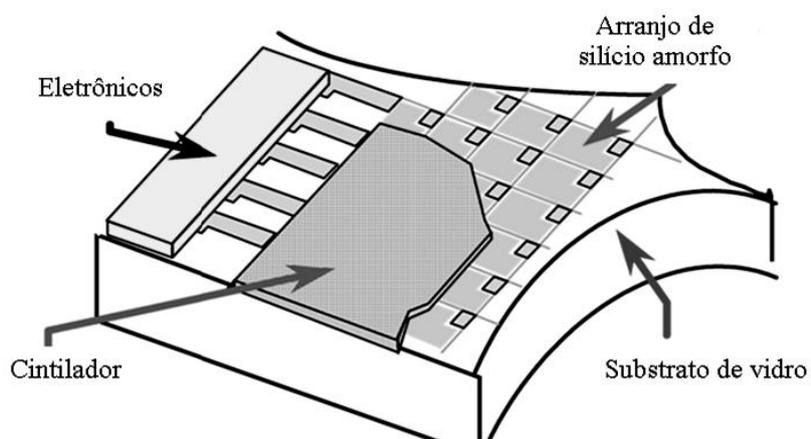


Figura 2.5. Desenho ilustrativo da estrutura de um DDA de conversão indireta (ASTM E2736-10).

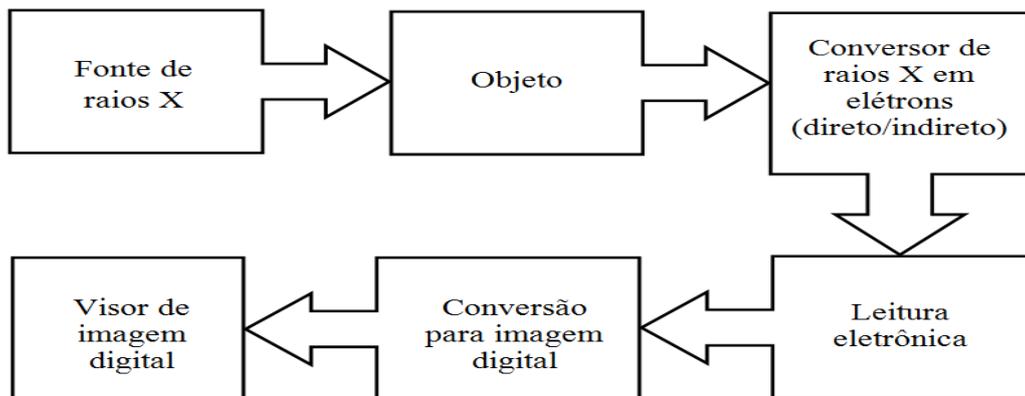


Figura 2.6. Diagrama básico de um sistema de imagem digital com raios X (ASTM E2736-10).

O funcionamento básico do DDA consiste na captura de raios X ou raios gama, seguidos de uma estrutura de leitura pixelada, ou seja, formada por vários *pixels* (elemento digital). Há várias opções de construção de um DDA, mas duas características bastante comum são pela forma de captura da radiação, que pode ser de forma direta ou indireta. Pela forma direta, a radiação é captada diretamente por materiais fotocondutores conhecidos como semicondutores, e transformada em cargas elétricas. A maneira indireta, é caracterizada por apresentar um material cintilador (Figura 2.5) sobre a estrutura da matriz de sensores (fotocondutores), no qual há primeiramente o processo de conversão da radiação (X ou gama) em luz para posterior captação dessa, pelos fotocondutores, geralmente de silício amorfo (ASTM E2736-10).

Existem algumas tecnologias para este tipo de sistema digital em relação à estrutura de leitura: detectores de carga acoplada (CCDs - *charge coupled detectores*), detectores a base de metal de óxido de silício complementar (CMOS – *complementary metal oxide silicon*), estruturas de leitura de diodo transistor filme fino de silício amorfo e estruturas de diodo de silício cristalino linear ou superficial. Outros materiais e estruturas são também possíveis, mas no fim, um modelo pixelado é capturado e transferido a um computador para visualização. Nestas estruturas ficam acoplados os

materiais de conversão primária, através de uma ampla variedade de meios de acoplamentos, dispositivos ou circuitos. Assim, dessas possíveis combinações, são produzidos diferentes tipos de DDAs. Após essas diferentes formas de captura da radiação e conversão do sinal analógico nestes dispositivos de leitura, esse sinal é tipicamente amplificado e, por fim, digitalizado (ASTM E2736-10).

### 2.1.3 Métodos de Digitalização

O princípio básico da técnica de digitalização é tipicamente a conversão do sinal analógico em valores de *pixels* discretos. A digitalização é determinada por número de bits. Os DDAs podem ter geralmente 8 bits (256 valores de cinza), 12 bits (4096 valores de cinza), 14 bits (16384 valores de cinza) ou 16 bits (65536 valores de cinza). Quanto maior o número de bit mais acuradamente o sinal é quantizado (conversão do sinal analógico em sinais discretos).

Porém, é importante saber que, a digitalização está vinculada com o desempenho do dispositivo de leitura. A digitalização não necessariamente define a faixa de nível de cinza do DDA (ASTM E2736-10). Essa faixa produzida é definida pela habilidade do dispositivo de leitura (CCD, CMOS ou TFT, que serão definidos nas seções adiantes) em capturar o sinal, numa relação linear com o sinal gerado pelo dispositivo de conversão primária (cintilador, onde ocorre a conversão dos raios X em luz visível).

Uma larga faixa de nível de cinza é obtida por um digitalizador de alta quantidade de bit. Porém, se por acaso a digitalização não for alta suficiente (com menor número de bit do que o alcançável pelo detector) para cobrir o conteúdo da informação a partir do dispositivo de leitura, isso pode resultar em sinal de ruído da digitalização. Esse fenômeno pode ser denominado de efeito de posterização (processo de redução do nível de cinza).

Reciprocamente, se a digitalização selecionada for significativamente maior do que a faixa do dispositivo de leitura (maior número de bit do que o alcançável pelo

detector), então a quantização (amostragem) adicionada não pode necessariamente melhorar o desempenho. Em outras palavras, se a digitalização for concluída além da faixa linear da estrutura de leitura, estes níveis de cinza adicionais não seriam amostráveis.

Assim, a faixa útil de um detector é geralmente definida como o máximo nível que pode ser atingido, sem saturação, em relação à faixa de ruído do DDA. Isso pode ser referida como faixa dinâmica do detector. Há uma diferença entre a denominação de faixa dinâmica do detector e de faixa de espessura de um material específico (SMTR - *specific material thickness range*) como definido nesta norma ASTM E2597-07. Esta última é uma faixa prática verdadeira do DDA, uma faixa mais estreita do que a faixa dinâmica do detector. Representa, para uma determinada espessura de um material específico, o sinal máximo possível alcançado pelo dispositivo. A SMTR é uma das propriedades a se considerar na seleção do DDA, visto que ela afeta a faixa de espessura que pode ser interpretada numa única visualização de uma imagem radiográfica digital. Vai depender da característica do dispositivo de leitura e o nível de digitalização (ASTM E2736-10).

#### **2.1.4 Componente Específico - Cintilador**

A função dos cintiladores em DDAs é correspondida como a primeira etapa do processo de aquisição de uma imagem radiográfica digital. Cintiladores são materiais que convertem fótons de raios X ou gama em fótons de luz visível, para posteriormente serem então convertidos em sinal digital.

A escolha da utilização de cintiladores é devido às suas propriedades, como listados na Tabela 2.1. Estas propriedades permitem alta eficiência, estabilidade e são resistentes, permitindo a produção de uma imagem ideal.

Tabela 2.1. Lista de propriedades de cintiladores ideais (ASTM E2736-10).

<b>Propriedades dos Cintiladores</b>	
1	Alto poder de frenamento para raios X, obtido pelo alto número atômico ou pelo uso de materiais de alta densidade, sem perda de informação espacial devido a processos de espalhamento dentro do cintilador.
2	Alta eficiência na conversão de raios X em luz.
3	Espectro de emissão do cintilador correspondente à sensibilidade espectral do dispositivo de coleta de luz.
4	Tempo de decaimento da luminescência curto.
5	Estabilidade de resposta durante longa ou intensa exposição à radiação.
6	Independência de temperatura da saída de luz.
7	Propriedades mecânicas e químicas estáveis.

A radiação ao atingir um material cintilador, os átomos/moléculas que o compoem absorvem esta energia e ficam excitados, posteriormente desexcitam emitindo energia na forma de luz visível. Esta energia emitida é denominada de luminescência, que depois se enquadram amplamente em duas categorias, fluorescência e fosforescência. O comportamento do processo de fluorescência é caracterizado por um decaimento da luminescência que não persiste por um intervalo de tempo superior a  $10^{-8}$  s, após o processo de excitação (caracterizada como decaimento de luminescência rápida) e a fosforescência é definida por um decaimento mais lento. Um cintilador ideal deve ter essencialmente só um componente de decaimento rápido, com uma conversão linear, isto é, a produção de luz deve ser proporcional a energia depositada. É muito importante saber que qualquer fosforescência (lentidão do processo de decaimento de luminescência) pode introduzir artefatos latentes residuais nas imagens subsequentes, dificultando a interpretação desta última. O fenômeno da fosforescência em cintiladores pode levar ao *image lag* ou *image burn-in*, tal como definido adiante, em que as características das imagens anteriores persistem nas novas imagens produzidas (ASTM E2736-10).

Existem alguns tipos diferentes de cintiladores utilizados em DDAs. Os mais comuns são o CsI:Tl (iodeto de cério ativados com tálio) e o policristalino Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb (oxissulfato de gadolínio ativado com térbio). Os policristalinos Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb, por exemplo, são bastante utilizados, mas são limitados em relação à espessura a qual podem ser construídos, apresentando um poder maior de espalhamento da luz produzida a partir do depósito de raios X, são mais simples de obtenção e implementação do que o CsI. O cintilador de Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb, assim como o de CsI:Tl, podem ser acoplados na estrutura de leitura através de uma lente fibra óptica ou diretamente. O acoplador óptico tem a função de melhorar a eficiência de transferência da luz, devido à incompatibilidade de índices, e são tipicamente mais caros para produzir e acoplar em estruturas de diodo maiores. Outros tipos de cintiladores, tal como os de vidro, por exemplo, que são baseados com ativação de térbio pode ser formados em placas de fibra óptica cintilante obtendo a mesma vantagem das estruturas de agulhas CsI. Estas placas também tendem a ter alguns inconvenientes temporais, e não são tão eficientes em converter os raios X em luz, como quaisquer um dos outros cintiladores mencionados anteriormente. Existem outros materiais que ainda estão em desenvolvimento e estudo para possíveis utilizações em DDAs (ASTM E2736-10).

### **2.1.5 Componente Específico - Semicondutores (Fotocondutores)**

O semicondutor tem a finalidade de converter a radiação em pares de elétron-buraco. Este processo pode ocorrer direta ou indiretamente. Em detectores de conversão direta, a radiação atinge diretamente o material fotocondutor e os de conversão indireta, esta radiação interage primeiramente com um material cintilador, produzindo luz visível e essa atingirá o fotocondutor. O primeiro, apresenta maior eficiência de conversão do que o com a produção de luz. Os DDAs utilizados neste trabalho são de conversão indireta, com material semicondutor de silício amorfo (ASTM E2736-10).

Nos detectores de conversão indireta, o material fotocondutor converte a luz produzida no cintilador em pares elétron-buracos, que são usados como portadores de

carga, como uma estrutura de eletrodo com a finalidade de separar os pares elétron-buraco. Para aplicações com raios X, os materiais fotocondutores, tais como o silício amorfo (a-Si), selênio amorfo (a-Se), CdTe e HgI<sub>2</sub> têm sido bastante utilizados. É importante destacar que embora a luz não seja gerada a partir desses materiais, os efeitos de *lag* e *burn-in* podem ocorrer devido à efeitos sutis de emissão de carga por fora do semicondutor (ASTM E2736-10).

### **2.1.6 Captura de Conversão de Imagem - Dispositivos de Carga Acoplada**

Dispositivos de carga acoplada (CCDs - *charge-coupled devices*) são dispositivos com estrutura de poli-silício. Devido à sua alta densidade de *pixel* (número de *pixels* por cm<sup>2</sup> no sensor - essa denominação de *pixel* aqui é da estrutura do detector, e não o *pixel* da imagem digital no *display*), são muito eficientes na coleta da luz produzida no material cintilador. Ao contrário das estruturas de *pixel* de silício amorfo, existe uma limitação da produção de cristais em grandes tamanhos, fato que tem restringido a fabricação desses dispositivos em arranjos maiores. Uma melhor captação da luz do cintilador pode ser obtido com o CCDs através de uma lente ou dispositivo de transferência de fibra óptica. A desvantagem da utilização de lente é a sua baixa eficiência na coleta de luz, enquanto as placas de imagem de fibra óptica tem melhorado significativamente a eficiência dessa coleta de luz, porém são caras. Para aplicações com pequeno campo de visão, a carga é diretamente acoplada junto ao dispositivo, onde fornece alta resolução espacial e alta eficiência de coleta de luz (ASTM E2736-10).

### **2.1.7 Estruturas de Leitura CMOS**

Estruturas de leitura baseadas em semicondutores de óxido metálico complementar (CMOS - *complementary metal oxide semiconductor*) é um circuito semicondutor formados de silício cristalino, mas a estrutura de leitura tem abordagens diferentes. Ao contrário dos CCDs, onde carga é geralmente transferida entre regiões de

*pixels* ativos, a tecnologia CMOS tem transferência individualmente para cada *pixel*. Sensores de imagem CMOS consomem menos energia do que CCDs. No entanto, eles são conhecidos por produzir mais ruído eletrônico do que CCDs. Como nos CCDs, eles podem acoplar vários cintiladores diretamente, tanto por lentes como por fibra óptica.

### 2.1.8 Estruturas de Leitura de Silício Amorfo

Transistores de filme fino (TFT – *Thin Film Transistor*) é uma estrutura de leitura pixelada à base de silício amorfo (a-Si), representando um grande *flat panel*. A Figura 2.7 fornece uma representação esquemática de uma arquitetura de DDA de silício amorfo. A camada de material cintilador é geralmente depositada ou acoplada diretamente sobre o silício, facilitando a eficiência óptica ou transferência de elétrons. Como pode ser construída para uma grande área de deposição do silício amorfo e técnicas de processamento/armazenamento, esta estrutura oferece vantagem em relação às limitações de tamanho de CCDs e CMOS (ASTM E2736-10).

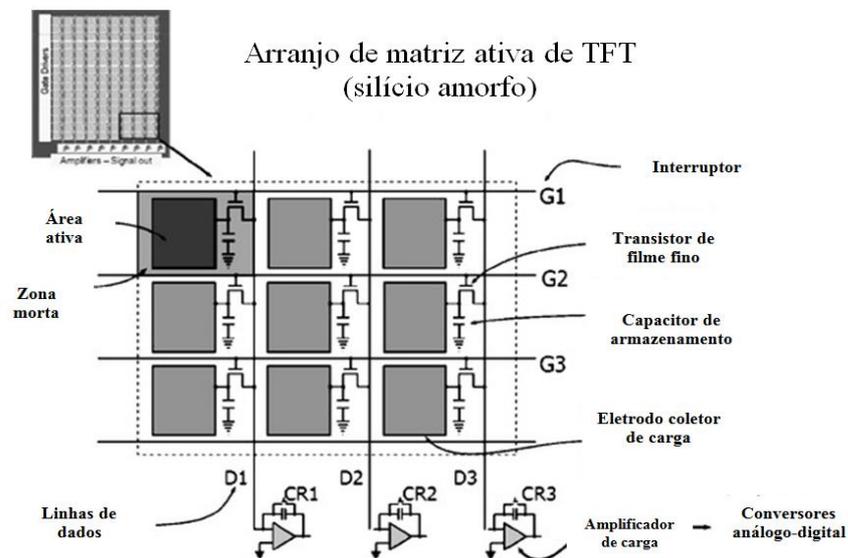


Figura 2.7. Representação esquemática de uma parte de um arranjo de matriz ativa de TFT (SEIBERT, 2006).

A matriz ativa TFT é composta de milhões de elementos detectores, cada um dos quais contém um transistor, eletrodo coletor e capacitor de armazenamento, todos dispostos em um substrato de silício amorfo. Os elementos individuais estão ligados por linhas de interruptores ao longo das linhas que operam o TFT, por linhas de dados ao longo das colunas (ligado à saída do TFT), e por amplificadores de carga (ligado às linhas de dados), que recebem as cargas a partir de específicos elementos detectores. Em operação, a carga gerada dentro de cada *pixel* do fotodiodo (área ativa de silício amorfo), pelo processo de absorção de raios X e cintilação, é armazenada em cada elemento detector e lida pelas linhas, uma de cada vez, permitindo a carga passar do capacitor de armazenamento através do TFT, para linha de dados e para o amplificador de carga. Cada transistor é zerado e pronto para a próxima exposição (SEIBERT, 2006). O amplificador de carga converte o pacote de carga em voltagem, seguido por um estágio de ganho programável e pela conversão analógico-digital (CAD), que converte a tensão para um número digital, que é transferido em série para um computador, onde os dados são formados em uma imagem de *pixel*  $N \times M$  ( $N$  = número de colunas e  $M$  = número de linhas).

### **2.1.9 Escolha da Estrutura de Leitura**

A escolha da estrutura de leitura é muito importante, por exemplo, para um bom desempenho de uma prática de inspeção. Irá depender do tamanho do objeto a ser inspecionado e das dimensões e características a serem observadas. Para aplicações com pequeno campo de visão, a utilização do CCD ou CMOS irá fornecer alta resolução espacial e eficiência em coleta de luz, pois esses dispositivos têm tamanho de *pixels* por volta de 10  $\mu\text{m}$ . Para aplicações com grande campo de visão, a abordagem de silício amorfo oferece uma excelente eficiência de coleta (sem lentes), sendo fino e compacto. No entanto, perde um pouco em relação ao tamanho de *pixel*, normalmente na ordem de 100  $\mu\text{m}$  ou mais (ASTM E2736-10).

### 2.1.10 Tamanho de *Pixel*

A informação sobre o tamanho do *pixel* de um DDA é muito importante, pois ele controla a sua resolução espacial. Representa a dimensão física bidimensional dos *pixels*. Os DDAs podem apresentar *pixels* no formato quadrado (isotrópico) ou retangular (anisotrópico), porém a maioria dos DDA tem *pixel* do tipo quadrado.

O aumento da resolução pode ser adquirido com a diminuição do tamanho do *pixel*, para uma área constante de visualização. Os tamanhos de arquivo para imagens são geralmente de 2 a 8 *megabytes* ou maiores. No entanto, existem outros fatores que também afetam a resolução espacial da imagem, tais como: (1) a penumbra geométrica da inspeção, (2) a espessura e propriedades do material cintilador ou fotocondutor utilizado para absorver os raios X e (3) várias fontes de espalhamento que podem degradar a modulação de detalhes numa imagem (ASTM E2736-10).

Para um material cintilador ou fotocondutor espesso, os fótons de raios X podem espalhar numa distância grande dependendo da sua energia e, portanto, afetar a resolução espacial. Outro fenômeno importante que pode ocorrer é a propagação óptica nos materiais cintiladores, especialmente os de camadas espessas. Em materiais fotocondutores espessos, os níveis de polarização (diferença de potencial) para condução dos portadores de carga para os eletrodos de leitura, também deve ser alta suficiente para evitar a propagação de elétrons que irá degradar resolução.

### 2.2.11 Níveis de Cinza

O nível de cinza máximo do detector é determinado através do número de bits, ou seja, esse tem valor determinado por  $2^n$ , onde  $n$  é o número de bit. Por exemplo, para um detector de 14 bits, os valores de cinza alcançáveis serão de 16384 ( $2^{14}$ ), que é também denominado de valor de saturação da imagem do detector. O GV (*gray value*) alcançável numa imagem será proporcional a dose de radiação recebido pelo detector (ASTM E2736-10).

### 2.1.12 Propriedades

O primeiro fator para um sistema digital apresentar um bom desempenho é a capacidade de controlar a interação de todos os seus componentes (toda a cadeia de imagem), que irá refletir na capacidade do sistema gerar a imagem final. Esta capacidade está relacionada principalmente pela tecnologia de captura de imagem, representação das imagens como dado digital, seus processamentos, reconhecimento de dados para um específico *display* de visualização e da tecnologia do *display*.

A qualidade da imagem do detector é uma importante medida para a escolha do detector e especificações do sistema. Ela é determinada por normas padronizadas de interpretação da imagem, ou seja, pela análise de parâmetros de qualidade da imagem, que são descritos mais adiante. Três importantes fatores influenciam diretamente na qualidade da imagem digital de um DDA: a propriedade inerente (ver Tabela 2.2), a técnica radiográfica em si e a qualidade do feixe de radiação utilizado para formação da imagem (ASTM E2736-10).

Tabela 2.2. Propriedades inerentes do DDA que influenciam na qualidade da imagem (ASTM E2736-10).

<b>Propriedades Inerentes do Detector</b>	
1	Medidas do sinal e ruído para uma determinada dose
2	Resolução espacial básica
3	Relação sinal-ruído
4	Eficiência da detecção
5	<i>Lag</i> do detector (imagens residuais)
6	Espalhamento interno da radiação
7	<i>Pixels</i> defeituosos
8	Sensibilidade ao contraste
9	Faixa de espessura de um material específico

### 2.1.13 Sinal e Ruído

O sinal obtido pelo DDA é a resposta deste detector à dose de radiação incidente no detector, enquanto que o ruído é a variação do sinal lido para a mesma quantidade de dose. Características do sinal e ruído do detector digital dependem da qualidade da radiação e da estrutura do DDA. Qualidade da radiação, que é definida pelo espectro do feixe utilizado, está diretamente relacionada com a eficiência do detector, e que por sua vez está relacionada à eficiência quântica do cintilador. Quanto maior eficiência quântica do cintilador, maior será a SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) do detector. A estrutura do DDA é caracterizada pelo tipo de cintilador e de cadeia de conversão de sinal utilizados e sua estrutura eletrônica associada. Num sistema de DDA otimizado onde segue estatísticas de Poisson, o ruído é proporcional à raiz quadrada do nível de sinal capturado (ASTM E2736-10).

O feixe de raios X transmitido, por exemplo, propaga através de vários estágios de conversão de energia. Os quanta primários são radiações incidentes em uma determinada área da superfície do detector (primeiro estágio). Uma fração dessa, dada pela eficiência da absorção (eficiência quântica) do material, interage (segundo estágio). Neste segundo estágio é importante que a eficiência da absorção seja alta, ou uma dose grande de radiação é necessária até chegar num nível de sinal desejado. A SNR, portanto, aumenta com a raiz quadrada do número de quanta que interage com o detector. Independentemente do valor da eficiência quântica, a SNR máxima do sistema ocorrerá nesse ponto ( $SNR = \sqrt{N}$ , onde N é o número de quanta do segundo estágio). O desempenho aumentará se mais fótons da radiação são capturados. Porém, qualquer processo subsequente na emissão de luz e sua captura pelo fotodiodo resultam em perdas e fontes adicionais de ruído. Tanto em detectores de conversão indireta, onde o material cintilador fica em contato direto com o diodo, quanto de conversão direta, onde a radiação interage diretamente no fotocondutor, a fonte limite de ruído é a eficiência quântica do material de conversão da radiação (ASTM E2736-10).

Um exemplo prático é observado em ensaios não destrutivos (END), onde pode ser possível aumentar os níveis de sinais, selecionando qualquer uma ou todas as

seguintes características: (a) um maior tempo de exposição, (b) uma combinação de *frames* (c) um maior fluxo de feixe, (d) uma maior energia do feixe de radiação, (e) uma distância menor entre fonte e detector ou (f) um DDA diferente com uma maior detecção de absorção primária média (cintilador e fotocondutor). No entanto, é importante salientar que, um material absorvedor mais espesso (cintilador ou fotocondutor) pode afetar também a resolução espacial do DDA. Portanto, compensações devem ser feitas na escolha do detector apropriado e da técnica a ser utilizada para uma dada aplicação.

Portanto, o ruído do dispositivo, bem como o esquema de acoplamento, é importante na seleção do DDA para certa aplicação. Calibrações adequadas do DDA resultam também em uma redução do ruído.

#### **2.1.14 Resolução Espacial Básica**

A resolução espacial básica (SRb – *basic spatial resolution*) está relacionada com o grau da perda de definição da imagem (penumbra geométrica) e é definida como sendo a capacidade de um sistema de imagem distinguir a separação entre dois pontos adjacentes (WILLIAMS, 2007). Pode ser definida também como o menor detalhe geométrico, que pode ser resolvido utilizando o DDA. É similar ao tamanho de *pixel* efetivo e é tipicamente expresso em  $\mu\text{m}$ . A SRb é medida geralmente através de um IQI de fio duplo (ASTM E2002), onde é medido o valor da penumbra da imagem, por um perfil de linha traçado sobre a imagem dos pares de fio. O padrão de medida com mínimo de 20 % de modulação de contraste (relação entre os sinais mínimos e máximos na imagem do perfil de linha) é assumido como o par de fio visível. A metade do valor da penumbra corresponde ao tamanho de *pixel* efetivo ou a resolução espacial básica (como veremos na seção seguinte sobre o indicador de qualidade de fio duplo).

Dentre uma série de fatores que estão atrelados à resolução espacial, tem-se o tamanho e quantidade de *pixel* (KRUPINSKI, 2007). O tamanho e a quantidade de

*pixels* de uma imagem são fatores determinantes para a análise de detalhes em uma imagem digital. Uma boa resolução da imagem requer *pixels* menores possíveis. Outro fator importante é o número de bits usados para representar cada *pixel*. Este fator afeta o número de níveis de cinza, assim sendo, quanto maior o número de bits por *pixel*, maior será os níveis de tons de cinza da imagem (OLIVEIRA, 2007).

De fato, a resolução espacial, refere-se ao número de valores de *pixel* por unidade de comprimento. Porém, para fins práticos, a resolução espacial é medida pela quantidade de linhas próximas que podem ser visualizadas (resolvidas) por milímetros (conhecida como resolução espacial básica) e não pelo número de *pixels* (MOREIRA, 2010).

A SRb pode ser medida em diferentes formas, mas o comitê de normas recomenda o uso do método de IQI de fio duplo devido a sua simplicidade (EN 462-5, ISO 19232-5 e ASTM E2002). A medida com o IQI de fio duplo fornece um valor total da penumbra da imagem em  $\mu\text{m}$  (EWERT, 2011).

#### **2.1.14.1 Indicador de Qualidade de Imagem de Fio Duplo**

O IQI de fio duplo consiste em uma barra fabricada em plástico, a qual em seu interior contém 13 pares de fios metálicos de diferentes espessuras numerados de 1D a 13D, conforme Figura 2.8-a. O espaçamento entre os fios, para cada par, é igual ao diâmetro dos mesmos. Porém, também existe o IQI de fio duplo com 15 pares (Figura 2.8-b), utilizados para práticas que exigem maior resolução de detalhes.

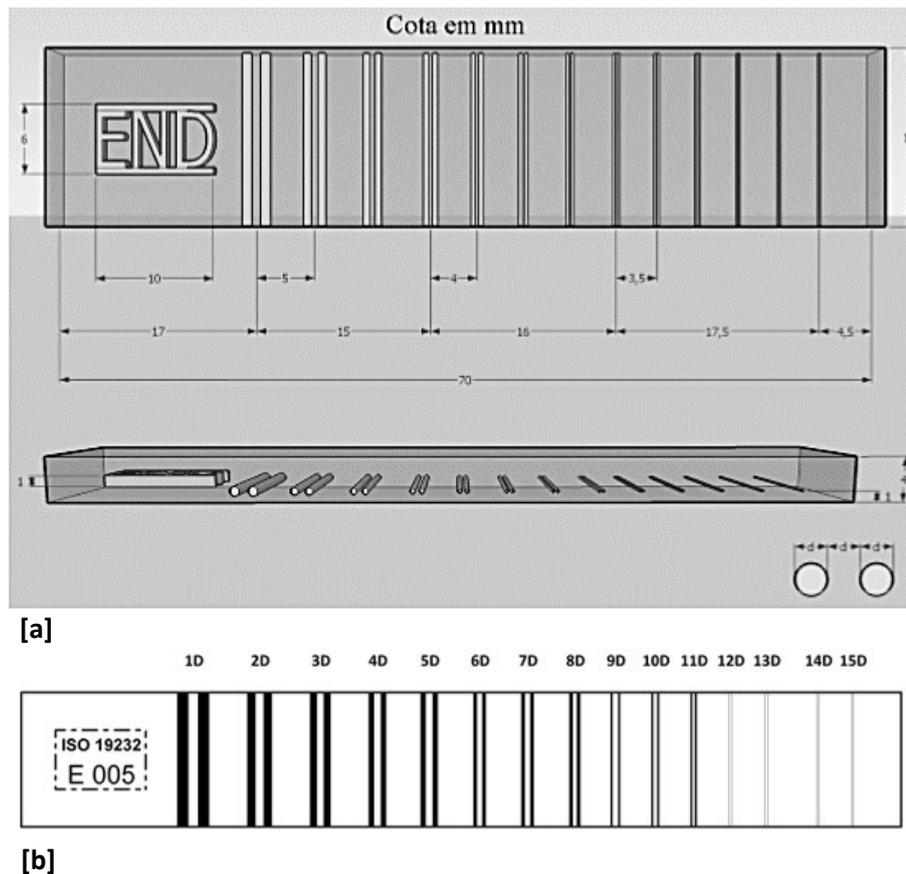


Figura 2.8. Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) de fio duplo, [a] com 13 pares de fios, para análise de resolução espacial básica da imagem (OLIVEIRA, 2010) e [b] com 15 pares de fios (fonte: <http://ndtsupply.com>).

A SRb é determinada, portanto, pelo valor da penumbra total ( $u_T$ ), que é igual a  $2d$ , onde  $d$  é o diâmetro do fio. Na Tabela 2.3, são apresentados: a numeração dos elementos (pares de fio); o valor da penumbra correspondente ( $2d$ ), o espaçamento entre os fios ( $d$ , valor do diâmetro do fio), a tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm). O valor da SRb é obtido pela Equação 2.1.

$$SRb = \frac{1}{2} u_T \quad (2.1)$$

A SRb do detector é considerada como a resolução espacial básica (tamanho do *pixel* efetivo) medida com IQI de fio duplo diretamente sobre a superfície do detector

(ver ASTM E2597-07). SRb da imagem é considerada aqui como resolução espacial básica da imagem, medida com IQI de fio duplo (ASTM E2002) no lado fonte do objeto, com contribuições da ampliação e penumbra do objeto, que também é uma fonte de espalhamento da radiação.

Tabela 2.3. Valores dos Parâmetros do IQI de fio duplo.

Nº do Par de Fio	Penumbra Geométrica (mm)	Diâmetro do Fio (mm)	Tolerância (mm)	pl/mm
15D	0,06	0,032	±0,004	15,600
14D	0,08	0,040	±0,004	12,500
13D	0,10	0,050	±0,005	10,000
12D	0,13	0,063	±0,005	7,936
11D	0,16	0,080	±0,005	6,250
10D	0,20	0,100	±0,005	5,000
9D	0,26	0,130	±0,005	3,846
8D	0,32	0,160	±0,010	3,125
7D	0,40	0,200	±0,010	2,500
6D	0,50	0,250	±0,010	2,000
5D	0,64	0,320	±0,010	1,563
4D	0,80	0,400	±0,010	1,250
3D	1,00	0,500	±0,02	1,000
2D	1,26	0,630	±0,02	0,794
1D	1,60	0,800	±0,02	0,625

Em prática, para obter o valor da SRb do sistema, utiliza-se um programa para análise de imagem onde, primeiramente, é traçado o perfil de linha da imagem do IQI. Esse perfil de linha gera um gráfico dos valores de cinza, em função da distância, como pode ser visto na Figura 2.9.

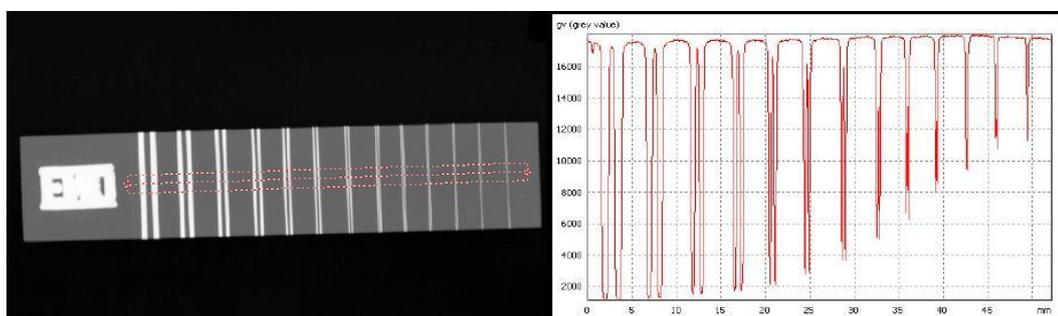


Figura 2.9. Imagem radiográfica do IQI de fio duplo e seu respectivo perfil de linha.

O valor da resolução espacial básica é definido como a metade do valor da penumbra,  $u_T$ , (Equação 2.1) do primeiro par de fios não resolvido, ou seja, quando a separação entre os fios não pode ser visualizada. O critério para a determinação do par de fios não resolvido, é a análise da diferença entre os valores de máximo e mínimo de intensidade no perfil de linha. Se esta diferença for menor do que 20% da intensidade máxima, é considerado que o par de fios não está resolvido, conforme a Figura 2.10.

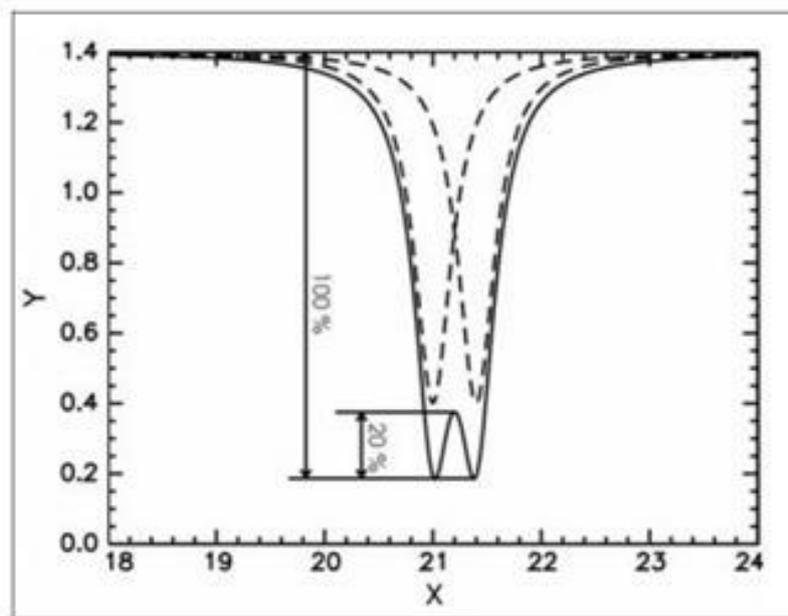


Figura 2.10. Perfil de linha de um par de fios, mostrando a diferença, de pelo menos 20%, dos valores máximos e mínimos de intensidades, entre os dois fios.

#### 2.1.14.2 Função Transferência de Modulação

A Função Transferência de Modulação (MTF – *modulation transfer function*) é uma medida de capacidade do sistema em reproduzir o contraste da imagem de uma diferença de espessura e/ou densidade do objeto em várias frequências espaciais, ou níveis de detalhes. Quanto maior os valores da MTF, melhor a nitidez e resolução de

uma imagem (MOREIRA, 2010). A MTF é também um fator que mede a qualidade da imagem e é determinada através do IQI de fio duplo. A partir da leitura dos valores dos máximos e mínimos de intensidade correspondente a cada par de fios, pelo perfil de linha, é gerada uma curva MTF em função do número do par de fios (pl/mm) normalizada (Figura 2.11), assim, o primeiro par de fios corresponde a 1 (100%) e os outros serão menores que 1, uma vez que, com o aumento da frequência fica mais difícil identificar a separação entre os pares de fios. Quanto maior os valores da MTF, melhor a nitidez e resolução de uma imagem (MOREIRA, 2010).

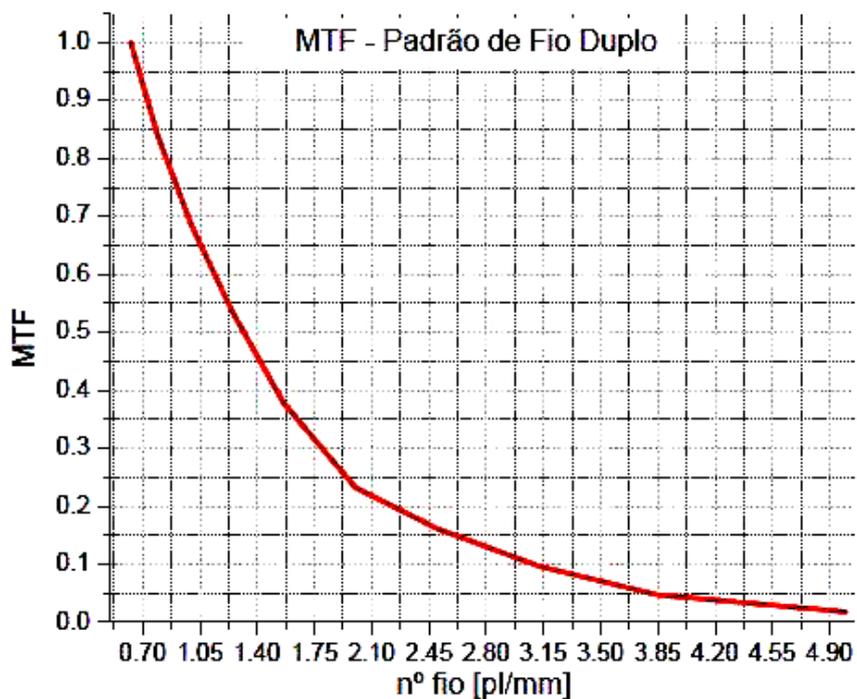


Figura 2.11. Curva de MTF (MOREIRA, 2010).

A resolução de detectores de imagens pode ser também usualmente expressa em termos de MTF (*Modulation Transfer Function*) de uma amostra. Isso descreve

características transferidas do sinal em função da frequência espacial levando e conta todos os estágios de detecção, entre o sinal da imagem sem e com um objeto.

A MTF pode ser medida pela aquisição da imagem de um *phantom* (geralmente uma placa com as bordas bem alinhadas e colocadas sobre a superfície do detector inclinada aproximadamente a 5° em relação à coluna ou linha da matriz), por exemplo. Em um programa de análise de imagem é gerado um perfil numa região próximo a borda do *phantom*, usando valores de *pixel* na posição da borda para N linhas consecutivas. O resultado é obtido por lp/mm (pares de linha por mm), calibrado para o tamanho de pixel do detector.

### **2.1.15 Relação Sinal-Ruído**

A relação sinal-ruído (SNR- *Signal-to-Noise Ratio*) é o quociente do valor médio da intensidade (sinal) e o desvio padrão do sinal (ruído). Caracterizado como qualquer sinal indesejado que interfere na detecção ou processamento do sinal desejado. Este fator de qualidade da imagem degrada o desempenho do sistema e quanto maior for à relação sinal-ruído (Figura 2.12), maior será a qualidade da imagem em termos de visualização de detalhes (OLIVEIRA, 2010). A SNR depende da dose de radiação e das propriedades do DDA.

Portanto, a qualidade da imagem, em termos da capacidade de ver uma descontinuidade em uma imagem depende da SNR. Ela determina o tamanho da descontinuidade que pode ser detectado confiavelmente em imagens radiográficas digitais (MOREIRA, 2010).

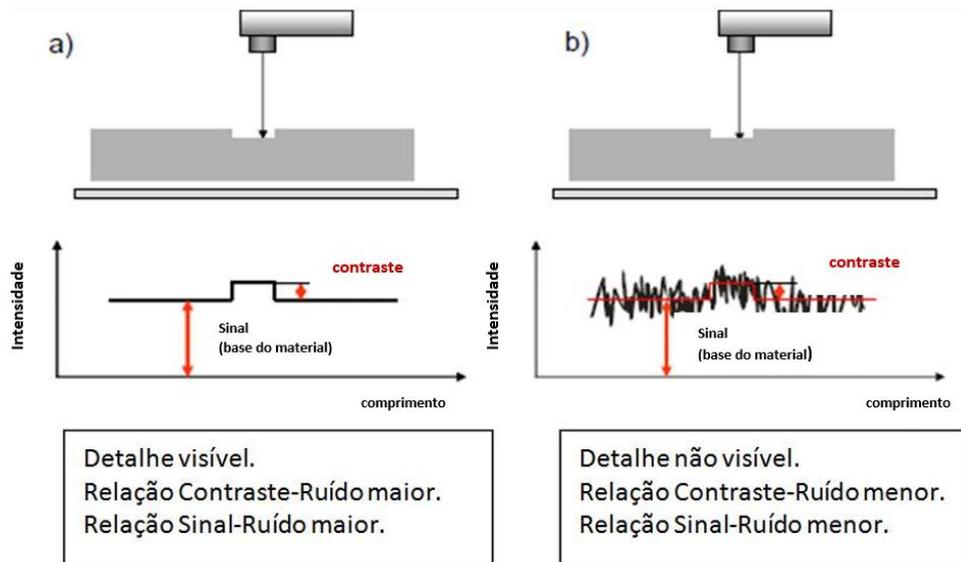


Figura 2.12. A influência do ruído na visibilidade de um detalhe na radiografia: a) o detalhe é visível se a contribuição do ruído pode ser ignorada; b) o detalhe não é visível se o ruído for maior do que o contraste (EWERT, 2011).

O cálculo da SNR é descrito pela razão da intensidade média do sinal pelo seu desvio padrão (Equações 2.2, 2.3 e 2.4). Este valor pode ser obtido por meio de programas de processamento de imagem.

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (2.2)$$

onde

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i,j} X_{i,j} = \bar{X} \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_{i,j} - \bar{X})^2}{(N) - 1}} \quad (2.4)$$

onde  $i$  e  $j$  são respectivamente o número de linhas e colunas da área utilizada para determinar a SNR,  $X_{i,j}$  é o valor da intensidade de cada ponto e  $N$  é a amostragem (número de *pixels*).

A relação sinal-ruído normalizada ( $SNR_N$ ) é obtida quando a SNR é normalizada pela SRb e é calculada a partir da Equação 2.5.

$$SNR_N = \frac{SNR_{média} \times 88,6}{SRb} \quad (2.5)$$

Para comparação de DDAs com diferentes formatos de *pixel* uma primeira aproximação pode ser feita para normalizar a SNR pela resolução espacial básica (SRb), em  $\mu\text{m}$ . Para a normalização, o fator 88,6  $\mu\text{m}$  é usado como valor de linha de base, feita a partir dos procedimentos de normalização de filmes (ASTM E1815). A área de abertura circular para dosimetria de filme é a mesma que a área de uma caixa quadrada de amostragem digital com 88,6  $\mu\text{m}$  de lado. Assim, o *pixel* quadrado do DDA pode ser comparado numa relação de 1:1 ao filme.

Essa mesma  $SNR_n$  é também definida na norma ASTM E2736-10 para DDA. Esse parâmetro é importante e tem vantagens em comparação com as radiografias de filme, para análise da qualidade da imagem digital com DDA. A SNR de um DDA, juntamente com a qualidade da radiação e com o contraste relativo obtido pelo feixe de radiação no objeto, constituem um elemento de qualidade da imagem que se relaciona com a sensibilidade ao contraste do DDA. Quanto maior a SNR melhor a qualidade da imagem, melhorando a sensibilidade ao contraste, onde os níveis de ruído são superados em relação às diferenças de sinal. A SNR do sistema DDA pode ser aumentada significativamente pela captura de múltiplas imagens com configurações e integrações idênticas no computador (média de imagens, termo conhecido como *frames*).

#### **2.1.16 Eficiência**

A eficiência representa a habilidade do DDA para chegar a um valor de SNR. Isso é expresso geralmente através de um gráfico representando a SNR em função da dose de radiação incidente ao DDA. Uma boa medida da eficiência é a relação entre a

SNR<sub>n</sub> e a dose (ou raiz quadrada da dose) incidente na superfície do detector. Esta relação deve ser linear.

A Figura 2.13 mostra um exemplo de análise da eficiência de um DDA, pelo gráfico SNR<sub>n</sub> em função da raiz quadrada da dose, para várias energias de feixe de radiação, apresentada pela norma ASTM E2597. Cada detector digital tem um máximo de eficiência, normalmente relacionada com a espessura e absorção do principal meio de captura de radiação, isto é, com as propriedades inerentes do detector.

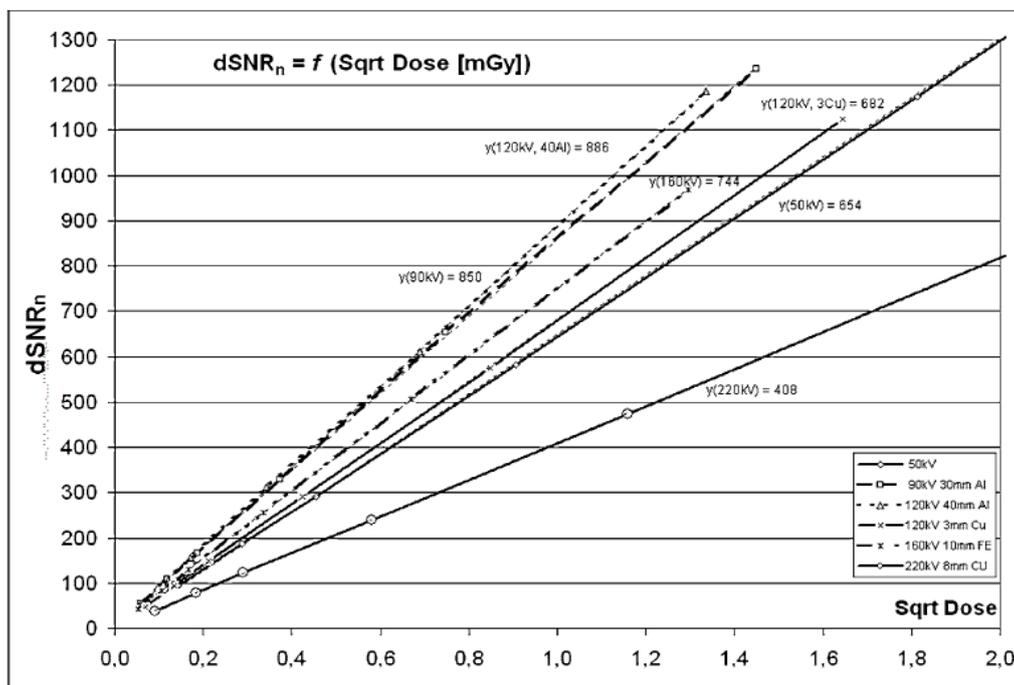


Figura 2.13. Exemplo de gráfico para teste de eficiência com diferença de imagens a diferentes tipos de energia (ASTM E2597-07).

### 2.1.17 Lag

O lag de um DDA está relacionado à persistência de um sinal residual logo após o término de uma exposição, e assim, uma imagem “fantasma” é mantida por certo tempo. Este fator é um processo indesejado, provoca artefatos na imagem e pode

aparecer nitidamente na próxima imagem que for adquirida. Pode ocorrer devido ao efeito de histerese no cintilador como também devido à escala de tempo limitada envolvida nos circuitos eletrônicos. É geralmente representado como um valor percentual do sinal retido após certo tempo de exposição. Esse fenômeno é mais observado em DDA de silício amorfo.

#### **2.1.18 Pixels Defeituosos**

Qualquer *pixel* de um DDA que tem um desempenho fora da faixa de especificação é denominado como *pixel* defeituoso (*bad pixel*). Os *pixels* defeituosos são também categorizados como, *bad pixels* isolados, aglomerado de *bad pixels* ou uma linha de *bad pixels*. Os *pixels* defeituosos são corrigidos geralmente através de calibrações realizadas pelos próprios programas dos DDAs.

#### **2.1.19 Sensibilidade ao Contraste**

A sensibilidade ao contraste (CS – *Contrast Sensibility*) é a capacidade de um sistema para distinguir diferenças de espessuras, de densidades e/ou composição química do objeto, através de uma diferença de sinal na imagem.

A sensibilidade ao contraste do DDA é dependente da SNR do dispositivo, e esse atua como limiar para detecção de contraste do objeto. Quando o contraste do objeto está abaixo do contraste limite alcançável do DDA, informações não estarão disponíveis suficientemente para criar um nível de sinal na imagem digital resultante para a percepção visual.

##### **2.1.19.1 Indicadores de Qualidade de Imagem de Fio**

O IQI para medida da sensibilidade ao contraste, conforme a norma ISO 19232-1, apresenta sete fios dispostos paralelamente (Figura 2.14), de espessuras diferentes,

cujo material deve ser similar ao material ensaiado. Quanto maior o número do arame, menor é o seu diâmetro. Isto indica que exigências mais rigorosas ou um nível de qualidade maior exigem que sejam visualizados arames mais finos.

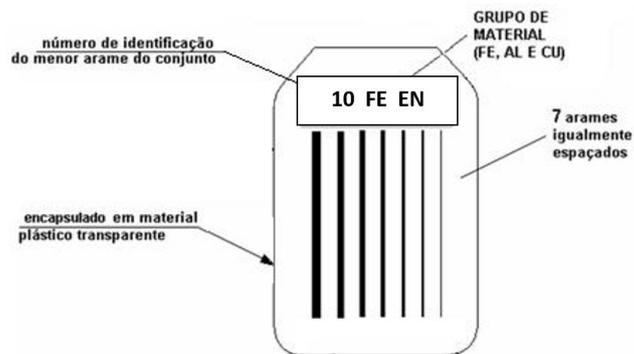


Figura 2.14. IQI de fio (ISO 19232-1).

Outro IQI utilizado para medida de sensibilidade ao contraste é o do tipo furo, da norma ASTM E1025-11. O IQI é escolhido de acordo com o material e espessura do objeto a ser inspecionado e apresenta três furos de diâmetros T, 2T e 4T, sendo T a espessura do IQI (Figura 2.15). A análise é realizada pela diferença de valor de cinza dentro e fora do furo, em função do ruído fora do furo.

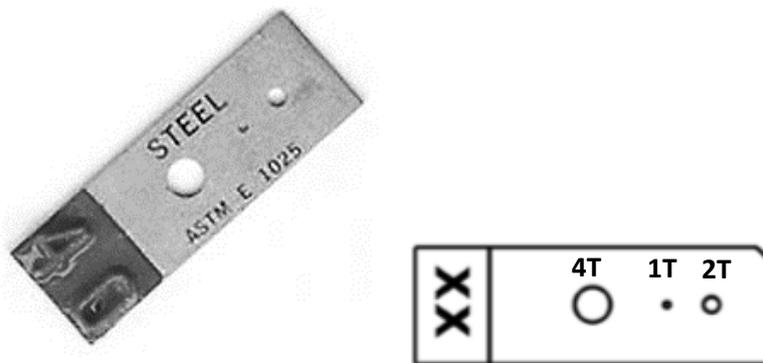


Figura 2.15. IQI de furo da norma ASTM E1025-11. Apresentam três furos, correspondendo ao tamanho do diâmetro em proporção à espessura T do IQI.

### **2.1.20 Faixa de Espessura do Material Específico**

A faixa de espessura do material específico (SMTR - *specific material thickness range*) define o alcance máximo para um material, que pode ser produzido na imagem com uma determinada qualidade da imagem, sobre certa qualidade de feixe da radiação. Esse fator é medido pelo valor da SNR alcançada em cada específica espessura de material, definindo assim, a faixa de espessura do material que apresenta uma boa qualidade da imagem.

### **2.1.20 Calibrações - Correção de Ganho e Offset**

O DDA requer frequentemente um processo de calibração, que é determinado pela correção de ganho e *offset* (imagem adquirida sem exposição à radiação), com objetivo de criar uma imagem ideal. A calibração forma uma importante etapa na aquisição da imagem, uma vez que existem variações de ganho de *pixel a pixel* inerentes e a presença de *background* ou sinais *offset* não uniformes. Também é corrigida a linearidade na resposta do DDA em relação à dose de raios X. Finalmente, ao contrário dos sistemas de filme e CR, a não uniformidade do feixe de raios X pode também ser corrigida, para fornecer uma imagem de ruído mais baixa ao longo de todo o detector. As calibrações são muito importantes nesses detectores para otimizar o desempenho dos DDAs. Geralmente é realizada por um *software* do sistema do detector (ASTM E2736-10).

### **2.1.21 Seleção de um DDA para Ensaios Não Destrutivos**

A seleção de uma DDA para uma específica prática de ensaios não destrutivos (END) pode ser realizada por uma simples análise da resolução espacial básica, sensibilidade ao contraste, faixa de espessura de um material e eficiência. As informações obtidas através de testes de caracterização oferece ao usuário final um meio quantitativo para comparação das propriedades intrínsecas dos DDAs de diferentes fornecedores, para a seleção do DDA mais adequado em determinada aplicação.

Algumas características de uma inspeção são importantes serem definidas para a seleção como, por exemplo, a rapidez de inspeção, especificações do tamanho da falha, objetivo da inspeção, faixa de espessura dos materiais a serem inspecionados, etc. Uma vez que estes parâmetros são definidos, os relatórios de caracterização de cada DDA serão úteis para comparar vários detectores e selecionar o que atenderá a necessidade do usuário (ASTM E2736-10).

### **2.1.22 Qualidade da Imagem Digital**

A qualidade da imagem depende das condições de exposição e das propriedades dos detectores digitais. Operadores em radiologia precisam de parâmetros confiáveis para a seleção do detector e corretas condições de exposição. Muitos parâmetros influenciam a qualidade da imagem digital, mas somente três são essenciais: resolução espacial básica (SRb), relação sinal-ruído (SNR) e contraste a sensibilidade (CS) (EWERT, 2012).

## **2.2 Metalurgia Moche**

Na costa norte do Peru atual (Figura 2.16) aproximadamente entre 1200 a.C. e 1375 d.C., várias civilizações relevantes surgiram: Cupisnique (1200-200 a.C.), Chavín (1000-200 a.C.), Vicús e Frías (200 a.C.-300 d.C.), Moche (100-600 d.C.) e Sicán (700-1375 d.C.). Entre elas, a mais importante, do ponto de vista da capacidade metalúrgica, foi a civilização Moche (também chamada de Mochica). A civilização Moche surgiu nas zonas a Sul da civilização Vicús, nos vales Moche e Chicama, onde seus grandes centros cerimoniais foram descobertos, com produções de cerâmicas pintadas, monumentos e ornamentos de ouro. As culturas Vicús e Moche prosperou dentre uma distância relativamente pequena entre si. A civilização Moche era conhecida como ferreiros de metais sofisticados, tanto em termos de sua tecnologia como em beleza de suas jóias (CESAREO *et al.*, 2016).



Figura 2.16. Região da civilização Moche é localizada no norte do atual Peru, ao redor de Chiclayo, Trujillo e entre os Andes e o Pacífico. A tumba da “Senhora de Cao” está localizada no *Complejo El Brujo* (por *Fundacion Wiese*).

A capacidade metalurgia Moche foi demonstrada por Regulo Franco Jordan, em 2005, quando descobriu a tumba da "Senhora de Cao" (Figura 2.17) (JORDAN et al., 2008, 2009, 2010 e 2011). Ornamentos de ouro e prata funerários foram escavados e são agora expostos no *Museo 'Tumbas Reales de Sipán'* em Lambayeque, perto de Chiclayo e no *Museo Cao*, cerca de 60 km ao norte de Trujillo.

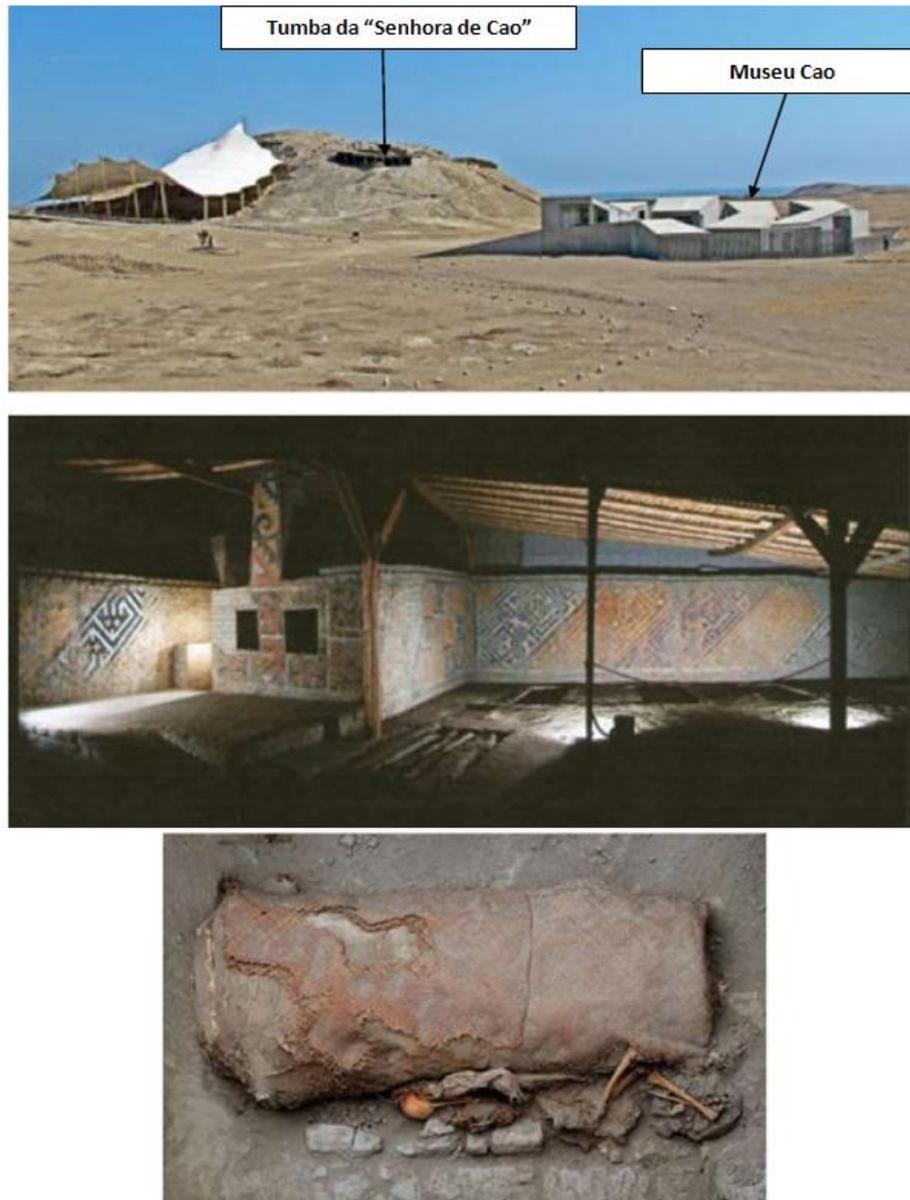


Figura 2.17. Fotos das escavações "pirâmides" (figura superior), túmulo da "Senhora de Cao" (meio) e sarcófago da "Senhora de Cao".

A pirâmide situa-se no *Complejo El Brujo*, várias centenas de metros do Oceano Pacífico e a alguns quilômetros do distrito de Magdalena de Cao, que é cerca de 60 km do norte de Trujillo (por *Fundação Wiese*).

Anteriormente, no final dos anos 1960, túmulos ricos de metais atribuídos à civilização Moche foram descobertos e saqueados em uma área que veio a ser conhecida como Loma Negra, na região de Vicús. Centenas de objetos atribuídos a Loma Negra foram vendidos para colecionadores norte-americanos e, finalmente, parcialmente transferido para o Museu Metropolitano de Nova Iorque (DEWANCKELE et al., 2013 e MANNESA *et al.*, 2014). O sitio da Loma Negra foi datada de cerca de segundo-terceiro século d.C., possivelmente antes dos túmulos da “Senhora de Cao” (~ 300 d.C.) e do “Senhor de Sipán” (~ 350 d.C.), contudo, essas datas são incertas.

Nada foi analisado antes do tesouro do túmulo da “Senhora de Cao”, mas vários estudos analíticos foram realizados em outros artefatos preciosos Moche. Um número relevante de artefatos, fabricados principalmente a partir de folhas de cobre, mas também em ouro, prata, ouro-prata e ouro prateado da Loma Negra, foi estudado e analisado por SCHORSCH (1998), empregando fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF) acoplado a uma microscopia eletrônica de varredura e por radiografia convencional. Em relação à tecnologia de junção metalúrgica Moche, SCHORSCH (1998) descreve diferentes métodos possíveis que utilizavam e algumas discussões, como seguem:

- Junção metalúrgica por difusão. Processo no qual ocorre uma ligação de metais em escala atômica para formar uma peça contínua, por vezes com a adição de uma camada de metal intermediário. Essa junta é bastante eficaz devido à interdifusão de átomos do metal no interior dos dois componentes unidos, e geralmente requer aplicação de calor.
- Junção metalúrgica por soldagem a martelada de metais sobrepostos.

- Soldagem por um método de união sem a introdução de um metal de preenchimento, em que a junção era realizada sem sobreposição das folhas de ouro e prata e sem muito martelamento, através da ação do calor.
- As alterações na espessura nas regiões de ouro e prata de algumas decorações de nariz, visíveis em radiografias, também sugerem que a conformação final e acabamento eram realizados após os metais terem sido interligadas.
- Folhas de ouro e prata eram montadas com as suas extremidades ligeiramente sobrepostas, posteriormente marteladas e aquecidas até que a fusão adequada ocorresse.

Pela variedade de composição dos objetos, os estudos analíticos da metalurgia Moche são extremamente complicados, devido à variedade de ligas e técnicas de fabricação, ao longo do tempo, e de estrutura.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento dessa pesquisa e as metodologias aplicadas.

#### 3.1 Materiais

##### 3.1.1 Testes de Caracterização do Sistema Radiográfico

Foram realizados esses testes no sensor *flat panel* CDR da Shick/Sirona (geralmente utilizado para fins odontológicos), com tecnologia APS-CMOS, conversão A/D de 12 bit (4096 níveis de cinza), tamanho do *pixel* de 40x40  $\mu\text{m}$ , área ativa de 30x20 mm, matriz da imagem de 750x501 *pixel* e composto por uma interface de conexão com o computador (Figura 3.1-a).

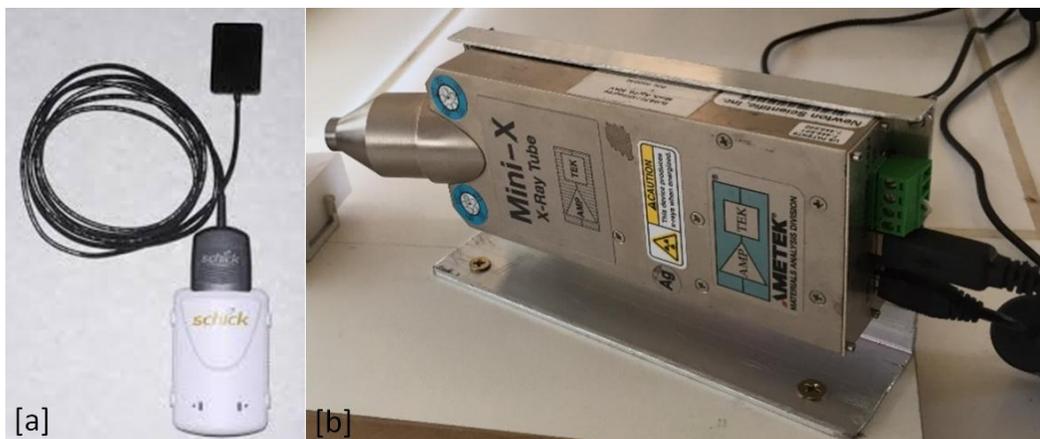


Figura 3.1. [a] sensor flat panel CDR da Shick/Sirona e [b] Mini tubo de raios X.

Para a realização desses testes foram utilizados: mini tubo de raios X da Amptek (Figura 3.1-b) com alvo de Ag, com voltagem e corrente máximas de 50 kV e 100  $\mu\text{A}$ , respectivamente, IQI de fio duplo (ASTM E2002); IQI de furo n° 12 (ASTM E1025);

placa de tungstênio de 2,5 mm de espessura e área de 50x50 mm e placas de liga de prata de diversas espessuras.

### 3.1.2 Ensaios Radiográficos das Peças Arqueológicas

Foram analisadas dez peças decorativas (tipos de joias utilizadas como decoração de nariz, denominadas de “narigueiras”), que apresentam sempre dois tipos de ligas metálica de: ouro e prata (Figura 3.2). O tamanho médio das peças é de aproximadamente 5,0x7,0 cm. Na Tabela 3.1 são informadas as composições das áreas de ouro (CESAREO, 2016) das peças decorativas analisada nessa pesquisa.



Figura 3.2. Peças decorativas (“narigueiras”) presentes no *Museo Cao*, localizado no Peru. Jóias encontradas junto à tumba da “Senhora de Cao”, uma múmia da civilização Moche, de aproximadamente 100-600 d.C.

Tabela 3.1. Composição de áreas de Au das peças decorativas (CESAREO, 2016).

Peça Decorativa	Au(%)	Ag(%)	Cu(%)
PD01	74,5	19,5	5,5
PD02	77,0	18,5	4,5
PD03	75,0	20,0	5,0
PD04	82,0	14,5	3,5
PD05	80,0	14,5	5,5
PD06	81,2	17,2	1,6
PD07	80,0	15,5	4,5
PD08	77,0	17,0	6,0
PD09	75,0	21,0	4,0
PD10	74,5	20,0	5,5

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Testes de Caracterização do Sistema Radiográfico

Foram realizados os seguintes testes: Resolução Espacial Básica (SRb), Função Transferência de Modulação (MTF), Sensibilidade ao Contraste (CS), Faixa de Espessura do Material (MTR) e Eficiência. Os procedimentos dos testes de SRb, MTR e Eficiência, foram adaptações dos apresentados na norma ASTM E2597; o teste de CS, da norma ASTM E2737 e de MTF, da norma EN 14784-1.

As imagens para os testes de SRb, MTF, CS e MTR foram adquiridas com condições de exposição de 50 kV de voltagem, 79  $\mu$ A de corrente, 1 s de tempo de exposição e 100 mm distância fonte-detector. Para as análises das imagens foi utilizado o programa *Isee!*.

#### 3.2.1.1 Resolução Espacial Básica (SRb)

Essa medida foi realizada utilizando o IQI de fio duplo (ASTM E2002), posicionado sobre a superfície do detector com uma inclinação de aproximadamente 5° em relação às linhas da matriz ativa (Figura 3.3).

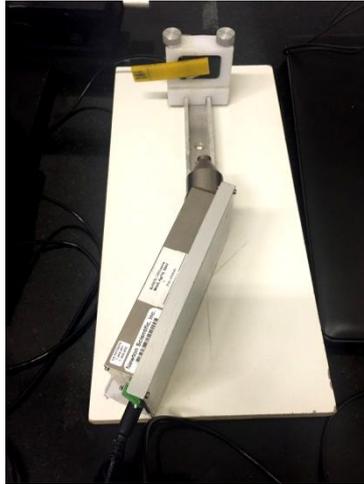


Figura 3.3. Sistema radiográfico para determinação da resolução espacial básica utilizando o IQI di fio duplo (ASTM E2002).

### 3.2.1.2 MTF (*Modulation Transfer Function*)

Essa medida foi obtida pela análise, primeiramente da  $MTF_{20\%}$  e  $MTF_{80\%}$ , posteriormente da  $MTF_{3\%}$  e  $MTF_{10\%}$ , através do perfil de linha em uma região de borda da imagem da uma placa de tungstênio, posicionada sobre o sensor com uma inclinação de aproximadamente em  $5^\circ$  em relação às colunas da matriz da área ativa do sensor (Figura 3.4).

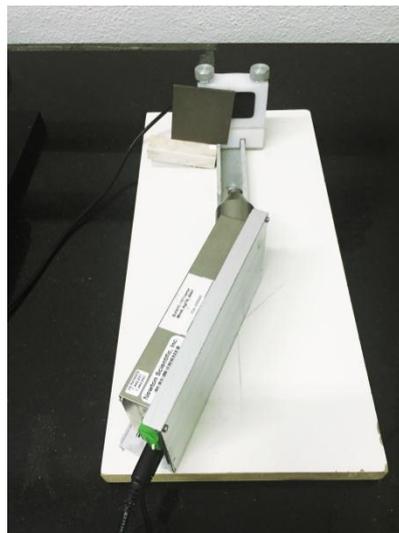


Figura 3.4. Sistema radiográfico para determinação da MTF utilizando uma placa de tungstênio.

### 3.2.1.3 Sensibilidade ao Contraste (CS)

Essa medida foi realizada através de um IQI de furo (ASTM E1025) de nº12, posicionado sobre a superfície de diferentes espessuras de placas de liga de prata (Figura 3.5). Primeiramente foi calculada relação contraste ruído (CNR – *Contrast-to-Noise Ratio*) de acordo com a Equação 3.1 (ASTM E2737-10).

$$CNR = \frac{GV_{furo} - GV_{fora}}{\sigma_{fora}} \quad (3.1)$$

Onde  $GV_{furo}$  é o nível de cinza médio medido numa região no interior do furo (numa área aproximadamente da metade da área do furo);  $GV_{fora}$  é o nível de cinza numa região próxima ao furo e  $\sigma_{fora}$  representa o desvio padrão na região fora do furo.



Figura 3.5. Sistema radiográfico para o teste de determinação da CS utilizando o IQI de furo (ASTM E1025).

O valor  $GV_{furo}$  foi obtido pelo valor de cinza médio, numa ROI (região de interesse) correspondente à metade do diâmetro do furo, em pixels. Para a determinação de  $GV_{fora}$ , foram delimitadas duas ROIs, uma duas vezes maior e outra quatro vezes

maior do que o diâmetro, respectivamente (Figura 3.6). Posteriormente computados o valor médio de cinza entre essas duas regiões e o desvio padrão correspondente.

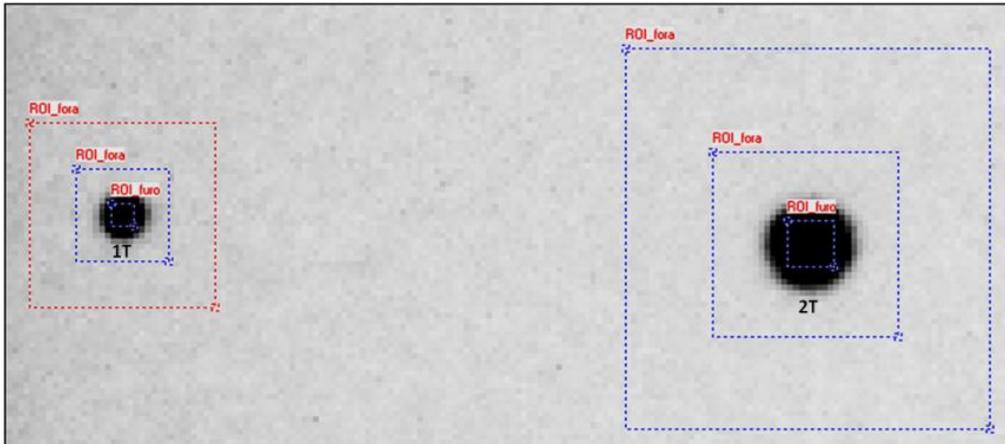


Figura 3.6. Ilustração da metodologia utilizada para determinação da CS no furo 1T e 2T do IQI (sendo T a espessura do IQI).

Posteriormente, foi calculada a sensibilidade ao contraste (CS), de acordo com a Equação 3.2 (ASTM E2737-10).

$$CS(\%) = \frac{GBV}{CNR} \times \frac{T_{IQI}}{T_{total}} \times 100 \quad (3.2)$$

onde GBV foi considerado 2,5;  $T_{IQI}$  é a espessura do IQI de furo e  $T_{total}$  é a espessura do material somado a do IQI de furo.

#### 3.2.1.4 Faixa de Espessura do Material (MTR)

Para o procedimento de medição da faixa de espessura do material específico

(MTR - *Material Thickness Range*), foram capturadas imagens das mesmas placas de ligas de prata do teste anterior. Posteriormente, foi computada a relação sinal-ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) para cada espessura do material, numa região de 20x55 *pixels*. O resultado foi apresentado em um gráfico da espessura do material em função da SNR.

### 3.2.1.5 Eficiência

O teste da eficiência foi caracterizado por uma avaliação da resposta do detector quanto à SNRn alcançada na imagem em função do aumento de dose de radiação. O aumento de dose de radiação foi realizado pelo aumento da corrente do tubo de raios X. Desta maneira, para esse teste foram capturadas cinco imagens sem algum objeto na frente do detector, utilizando valores de correntes de 20, 50, 60, 70 e 79  $\mu\text{A}$ ; com voltagem constante de 50 kV, 1 s de tempo de exposição e 100 mm de distância fonte-detector. A medida da eficiência foi obtida pela obtenção da SNRn (relação sinal-ruído normalizada) pela média de cinco áreas de 50x50 *pixels* de cada imagem radiográfica (Figura 3.7).

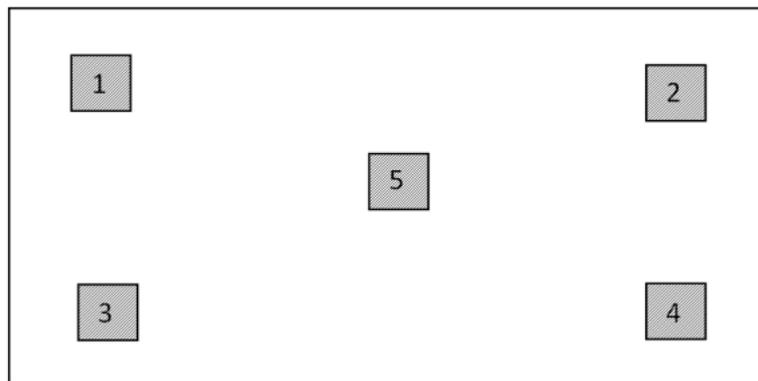


Figura 3.7. Ilustração do arranjo das áreas nas quais foram computadas a SNRn para o teste de avaliação da eficiência.

### 3.2.2 Ensaios Radiográficos das Peças Arqueológicas

Para a aquisição das imagens radiográficas digitais, foi construído um sistema radiográfico com o sensor *flat panel* posicionado a 40 mm do tubo de raios X (Figura 3.8). A distância fonte-detector não foi variada para as aquisições de todas as peças decorativas. A escolha de utilizar esta distância, deveu-se ao fato de obter um bom contraste na imagem e abrangesse uma área de análise suficiente, ao utilizar a energia máxima da fonte, principalmente em relação as regiões de ouro das peças, o qual tem maior coeficiente de atenuação a radiação.

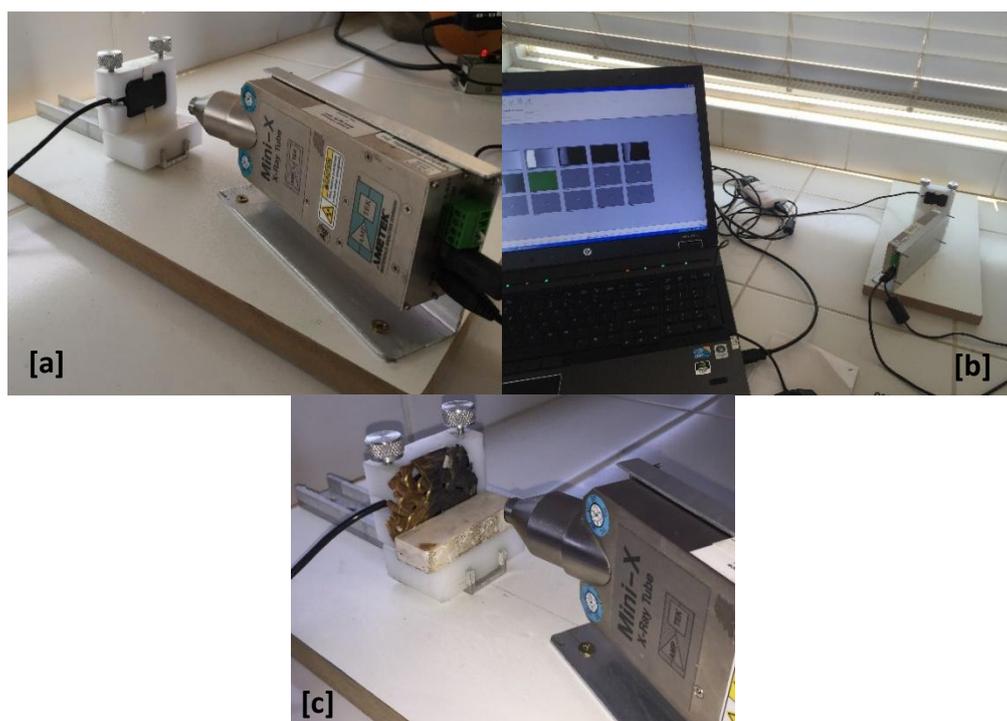


Figura 3.8. Sistema radiográfico constituindo [a] do sensor flat panel CDR e o mini tubo de raios X; [b] com o computador integrado, para a visualização imediata da imagem radiográfica e [c] a amostra posicionada sobre o detecto, no momento de uma aquisição da imagem radiográfica digital.

Devido à pequena área sensível do detector, 30x20 mm, as radiografias foram adquiridas em pequenas partes das peças, dando preferência as regiões de junções dos dois diferentes metais.

Uma limitação do equipamento radiográfico digital utilizado para esta análise foi a não possibilidade de variar o tempo de aquisição. A aquisição de uma imagem é obtida apenas com 1 s de tempo de exposição. O aumento do tempo de exposição ajudaria a diminuir o ruído da imagem, por exemplo, melhorando um pouco o contraste da mesma. Esse fato, limitou um pouco a qualidade da imagem.

A escolha das condições do tubo de raios X também foi de acordo com a espessura da peça em uma determinada região e o tipo de metal que se desejaria que prevalecesse um bom contraste na imagem radiográfica. A energia utilizada do tudo variou de 25 a 50 kV, e a corrente também foi variada de acordo com a tensão. Foram utilizados os programas *ISee!* v. 1.10.3 e *ImageJ*, para análise das imagens,

### **3.2.2.1 Técnica de imagem de múltipla-energia**

A técnica de múltipla energia consiste na obtenção, por processamento de imagem, de uma única imagem final a partir de várias imagens radiográficas adquiridas com energias diferentes, por meio de cálculos da média de sinal por *pixel* (i, j) de duas a duas imagens, de maneira escalonada.

Primeiramente, é calculada a média de sinal por *pixel* de duas imagens obtidas com energias diferentes. A seguir, é realizado um novo cálculo da média desse sinal resultante com o sinal da próxima imagem, de uma outra energia. Assim, sucessivamente, até a última energia, de acordo com as Equações 3.3 e 3.4.

$$A_{ij,n} = \begin{cases} S_{ij,n} = \frac{S_{ij,n}}{2^{N-1}} (n = 1) & (3.3) \\ S_{ij,n} = S_{ij,1} + \sum_{n=2}^N \frac{S_{ij,n}}{2^{N-n+1}} (n = 2, 3, \dots, N) & (3.4) \end{cases}$$

$S_{ij,k}$  é o sinal (valor de cinza) por *pixel* de uma imagem adquirida com uma energia  $E_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ; onde  $N$  é o número total de imagens).  $A_{ij,k}$  é a imagem de múltipla-energia obtida. Foi utilizado o programa *ImageJ* para o processamento das imagens.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados e discussões das pesquisas realizadas. Na seção 4.1, são apresentados os resultados quanto aos testes de desempenho e verificação do detector *flat panel* e na seção 4.2, são mostrados os resultados e discussões dos ensaios radiográficos das peças metálicas arqueológicas.

### 4.1 Resultados dos Testes de Caracterização do Sistema Radiográfico

#### 4.1.1 Resolução Espacial Básica (SRb)

Pela análise do perfil de linha da imagem do IQI de fio duplo, o fio não resolvido foi o 13º, correspondendo a uma SRb de 50  $\mu\text{m}$  (Figura 4.1), de acordo com a Tabela 2.3. Esse resultado caracteriza-se como a resolução espacial básica alcançada pelo sistema radiográfico.

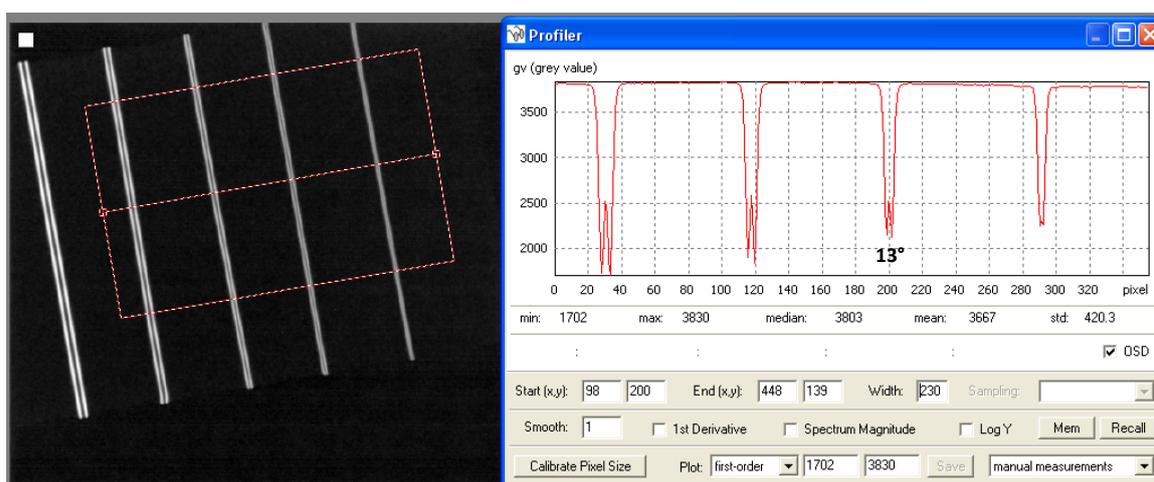


Figura 4.1. Determinação da resolução espacial básica do detector *flat panel* através do IQI de fio duplo (ASTM E2002).

#### 4.1.2 Função Transferência de Modulação (MTF)

O valor da  $MTF_{20\%}$  alcançada foi de 8,18 lp/mm (SR = 61  $\mu\text{m}$ ) e da  $MTF_{80\%}$  foi de 2,45 lp/mm, mostrados na Figura 4.2. Enquanto que o valor da  $MTF_{3\%}$  foi de 11,18 lp/mm (SR = 45  $\mu\text{m}$ ) e da  $MTF_{10\%}$  foi de 9,53 lp/mm (SR = 52  $\mu\text{m}$ ), mostrados na Figura 4.3.



Figura 4.2. Determinação da  $MTF_{20\%}$  e  $MTF_{80\%}$ .

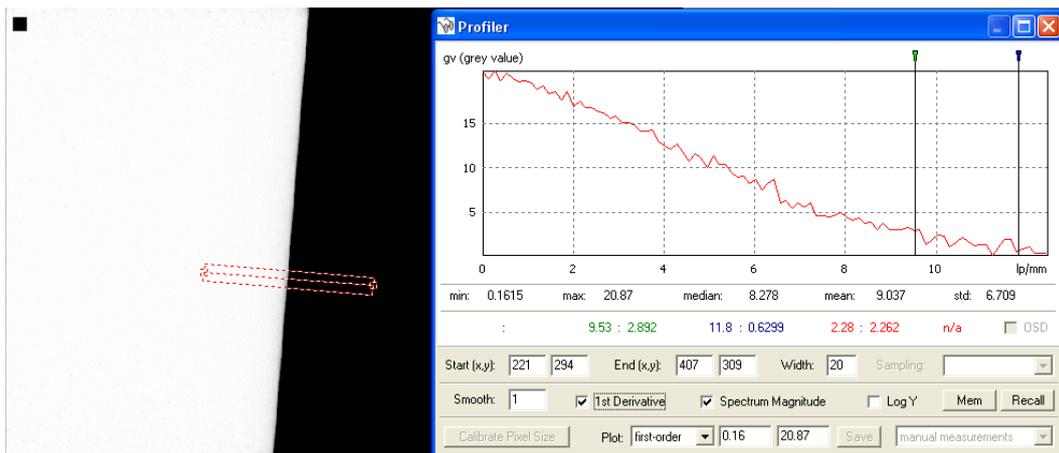


Figura 4.3. Determinação da  $MTF_{3\%}$  e  $MTF_{10\%}$ .

### 4.1.3 Sensibilidade ao Contraste (CS)

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores obtidos da CS, em relação aos furos 1T e 2T, para as seis diferentes espessuras da liga de prata. Neste teste, quanto menor o valor da CS(%) obtida, melhor o desempenho do detector quanto à sensibilidade ao contraste.

Em relação a cada furo, o valor da CS(%) aumentou com o aumento da espessura do material, ou seja, a qualidade da imagem quanto à sensibilidade ao contraste é reduzida. Quanto aos valores da CS(%) dos furos 1T e 2T, para cada espessura em particular, o furo 2T alcançou melhor valor de CS(%) em comparação com o 1T, um resultado esperado já que furo 2T ter o dobro do diâmetro do 1T.

Tabela 4.1. Valores obtidos da sensibilidade ao contraste (CS) para as diferentes espessuras da liga de prata.

Espessura do material ( $\mu\text{m}$ )	CS(%)	
	Furo 1T	Furo 2T
100	0,011	0,009
185	0,086	0,062
200	0,120	0,070
225	0,133	0,071
325	0,184	0,105
415	-	-

Foi realizado também um teste de capacidade de visibilidade dos furos 1T, 2T e 4T do IQI e o resultado é apresentado na Tabela 4.2, indicando “v” como furo visível e “n” como não visível. Somente para a espessura de 415  $\mu\text{m}$  da liga de prata não foi possível obter a visibilidade dos três furos.

Tabela 4.2. Determinação da visibilidade dos furos 1T, 2T e 4T do IQI de furo, indicando a visibilidade por “v” e a não visibilidade por “n”.

Espessura do material ( $\mu\text{m}$ )	Visibilidade do furo		
	1T	2T	4T
100	v	v	v
185	v	v	v
200	v	v	v
225	v	v	v
325	v	v	v
415	n	n	n

#### 4.1.4 Faixa de Espessura do Material (MTR)

O resultado deste teste é apresentado pelo gráfico da Figura 4.4, onde são indicados os valores da SNR alcançados pelo detector em relação com a espessura do material. Verifica-se que a SNR diminui com o aumento da espessura das placas de liga de prata e a faixa de 100 a 200  $\mu\text{m}$  obtiveram valores de SNR que são qualificados, para este sistema radiográfico e nas condições estabelecidas, como medianos para análise das imagens radiográficas. Esse fator é compensado pela alta SRb do sistema.

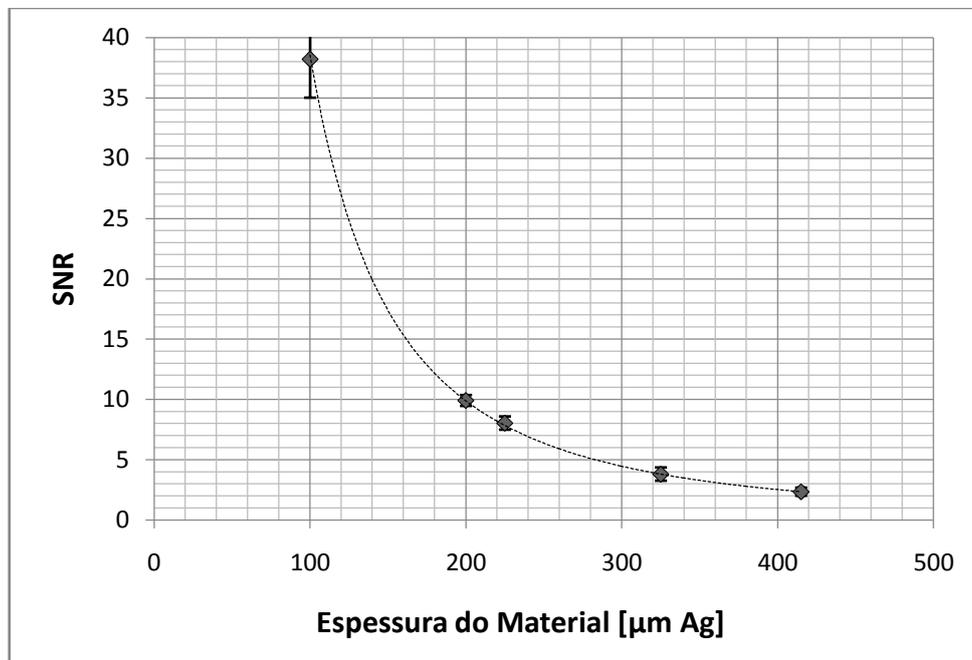


Figura 4.4. Determinação da MTR. Relação da SNR em função da espessura do material.

#### 4.1.5 Eficiência

O resultado obtido foi exposto em um gráfico da SNRn em função das medidas de  $\mu\text{A.s}$  (microamperagem segundo) utilizadas, mostrado na Figura 4.5. O gráfico mostra os valores da SNRn alcançada pelo detector em função do aumento da  $\mu\text{A.s}$ , nas imagens radiográficas capturadas (sem objeto), onde a faixa de alcance foi de 122 (20  $\mu\text{A.s}$ ) a 213 (para 79  $\mu\text{A.s}$ ). O detector apresentou uma resposta linear do seu desempenho, verificada pelo fator de qualidade da imagem SNRn, em função do aumento da dose de radiação.

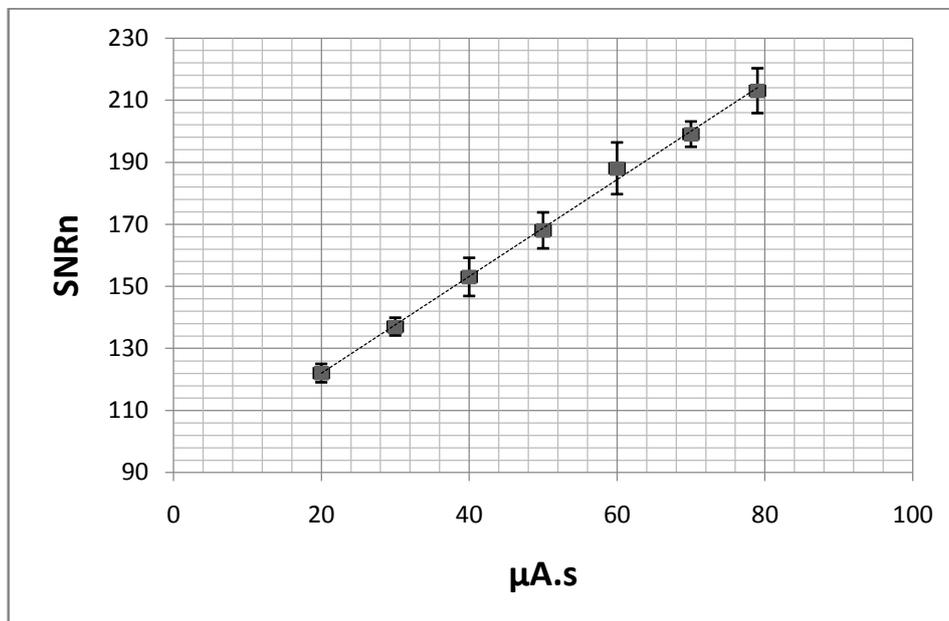


Figura 4.5. Determinação da eficiência, para a energia de 50 kV, pela relação da SNRn em função da variação da  $\mu\text{A.s}$  (microamperagem segundo).

#### 4.2 Análises das Imagens Radiográficas das Peças Decorativas Arqueológicas

A seguir são apresentadas e discutidas as imagens radiográficas digitais das peças decorativas arqueológicas, PD01 a PD10, respectivamente. As áreas de ouro das

peças decorativas são caracterizadas, aproximadamente, com a mesma composição, isto é,  $\text{Au} = (79,5 \pm 2,5)\%$ ,  $\text{Ag} = (16 \pm 3)\%$  e  $\text{Cu} = (4,5 \pm 1,5)\%$ , enquanto que as regiões de prata das mesmas peças, mostram resultados completamente irregulares e uma concentração sistemática alta de ouro (CESAREO, 2016).

Para fins de simplicidade, nesta pesquisa foram utilizadas somente as denominações regiões de “ouro” (ou Au) e “prata” (ou Ag), não descrevendo a composição real das ligas. Os perfis de linha de todas as peças foram obtidos sempre no sentido da região de prata para a de ouro, para uniformidade da análise.

#### 4.2.1 Peça Decorativa PD01

A peça decorativa PD01 (Figura 4.6) é composta por duas imagens simétricas de soldados, ambos segurando uma lança, formados de ouro; os chapéus acima das cabeças e escudos, formados de prata. A região dos pés dos soldados é parcialmente escurecida, aparentando a princípio conter a presença de uma camada de metal prata sobreposta a uma base de ouro.



Figura 4.6. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD01.

A Figura 4.7 mostra duas radiografias, de uma região do lado esquerdo superior da peça PD01 (Figura 4.7-a e 4.7-b, respectivamente), obtida com tubo de raios X operando a 25 kV-100  $\mu\text{A}$  e 50 kV-79  $\mu\text{A}$ , respectivamente. Na primeira imagem há um bom contraste da área de prata, onde é possível observar detalhes da moldura do chapéu,

porém a região do corpo, composto de ouro não alcançou um contraste suficiente para visibilidade de detalhes. No entanto, na segunda imagem a área de ouro alcançou um contraste suficiente para a observação de detalhes; observa-se o rosto do soldado e também da visibilidade da região de sobreposição da borda do chapéu de prata com a borda da cabeça de ouro.

A escolha da aquisição de imagens radiográficas com duas energias diferentes teve intuito de obter um bom contraste para visualização primeiramente da região da prata e a outra para a área de ouro. Como os dois metais apresentam coeficientes de atenuação da radiação diferentes, para determinada energia, não foi possível obter só em uma única imagem (adquirida com uma energia) detalhes dos dois materiais. Para fins de observação estrutural como um todo, sem análise de quantificação, foi obtida uma imagem pela técnica de múltipla energia (Figura 4.7-c), a partir das duas primeiras imagens (Figura 4.7-a e 4.7-b).

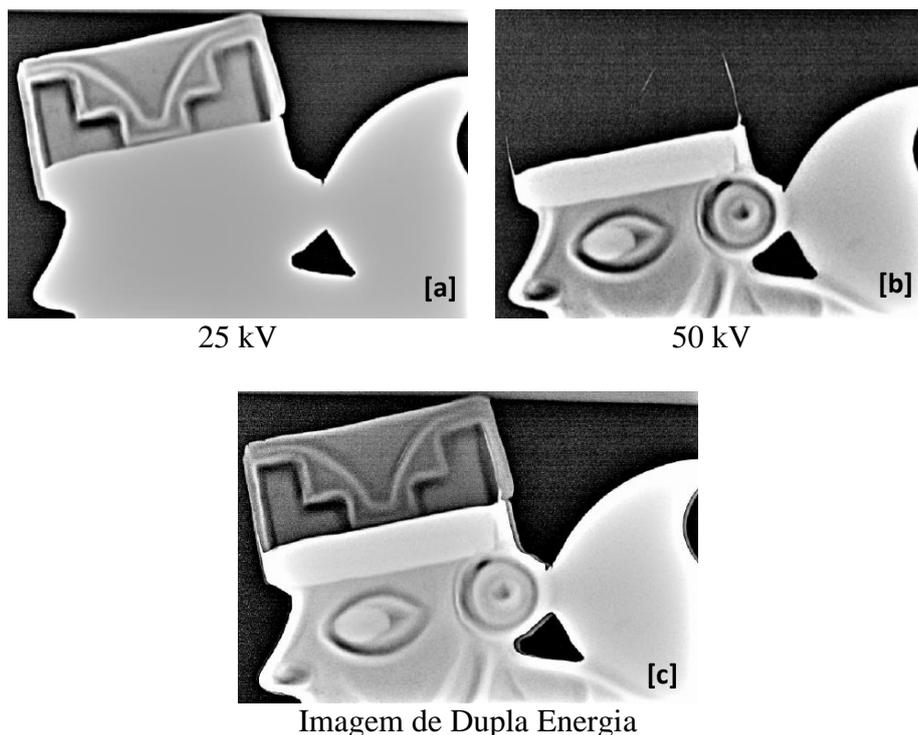


Figura 4.7. Imagens radiográficas da peça PD01, obtida a [a] 25 kV (para visualização da prata) e [b] 50 kV (para visualização de ouro) e [c] imagem de dupla energia, a partir das duas primeiras imagens (a e b).

Na Figura 4.8-a é mostrada a imagem radiográfica da região entre a cabeça do soldado do lado esquerdo da peça e o seu chapéu, com indicações das áreas de ouro (a cabeça) e prata (o chapéu). Foi possível visualizar uma sobreposição das áreas prata-ouro e do material intermediário utilizado para a soldagem desses metais (o chapéu com a cabeça do soldado). A Figuras 4.8-b mostra a fotografia da PD01, da região de soldagem das folhas de ouro e prata.

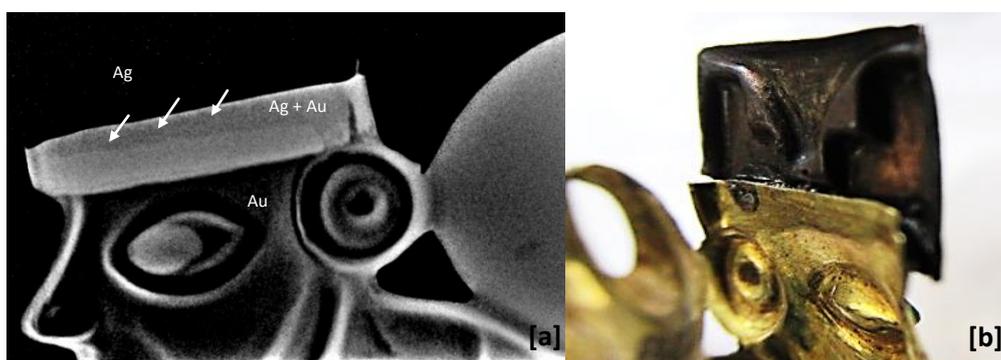


Figura 4.8. [a] Imagem radiográfica do lado esquerdo superior da peça decorativa PD01, com indicações de um material intermediário entre as folhas de prata e ouro, para soldagem; [b] fotografia da peça, da região de soldagem das folhas de ouro e prata.

A área contendo os quatro pés (Figura 4.9-a) é a mais complexa para explicação. As áreas que aparecem escuras na fotografia (Figura 4.9-a) exibem similar espectro de EDXRF (CESAREO, 2016) das regiões mais claras das pernas, concluindo ter a mesma composição. Desta maneira, de acordo com a observação da radiografia (Figura 4.9-b) e dos conceitos radiográficos, houve uma menor atenuação da radiação na região dos pés, concluindo que a folha de ouro há uma redução da sua espessura nessa região específica, por não haver mudança de composição entre as áreas clara e escura da narigueira. O escurecimento aparente ainda está sob análises de especialistas. Ainda pela análise radiográfica da peça, os escudos foram soldados por brasagem utilizando um material de solda intermediário, como indicados na Figura 4.9-b.

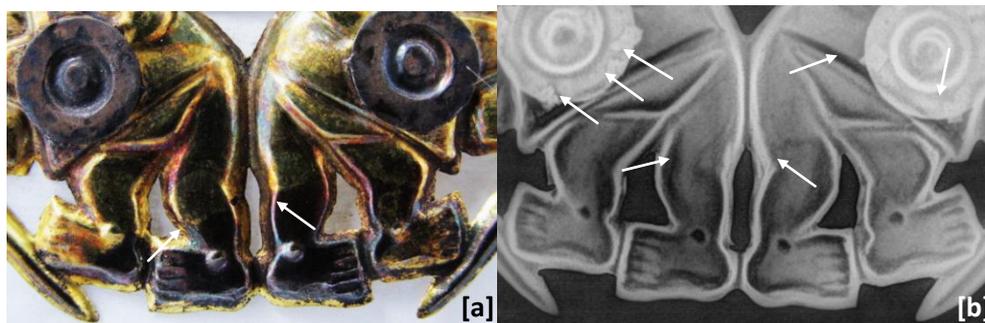


Figura 4.9. Imagens [a] fotográfica e [b] radiográfica da peça decorativa PD01, com filtro de aumento de detalhes. Pela radiografia é observada a presença de um material intermediário para a soldagem do escudo de sobre soldas os soldados de ouro e uma área pouco escuras nos pés.

As Figuras 4.10-a e 4.10-b apresentam perfis de linha (valores de cinza por *pixel*) das regiões destacadas nas imagens (as duas pernas centrais), no sentido de baixo para cima, indicando uma diminuição gradual do nível de cinza, da região dos pés para as pernas, evidenciando, como exposto no parágrafo anterior, a ocorrência de uma diminuição da espessura da peça nas áreas dos pés analisados.

Ainda pela análise dos perfis de linha, não há uma região intermediária significativamente acentuada de diferença de níveis de cinza (como será possível verificar em outras peças decorativas), porém foi destacada uma região onde houve uma pequena diferença no nível de cinza: o ponto I em destaque na Figura 4.10-a, onde há um pequeno aumento do nível de cinza, indicando uma diminuição de espessura do material um pouco maior nessa região. Enquanto que no ponto II em destaque na Figura 4.10-b, foi observada uma diminuição do nível de cinza somente um pouco mais definido, concluindo que ocorreu uma diferença no aumento da espessura do material.

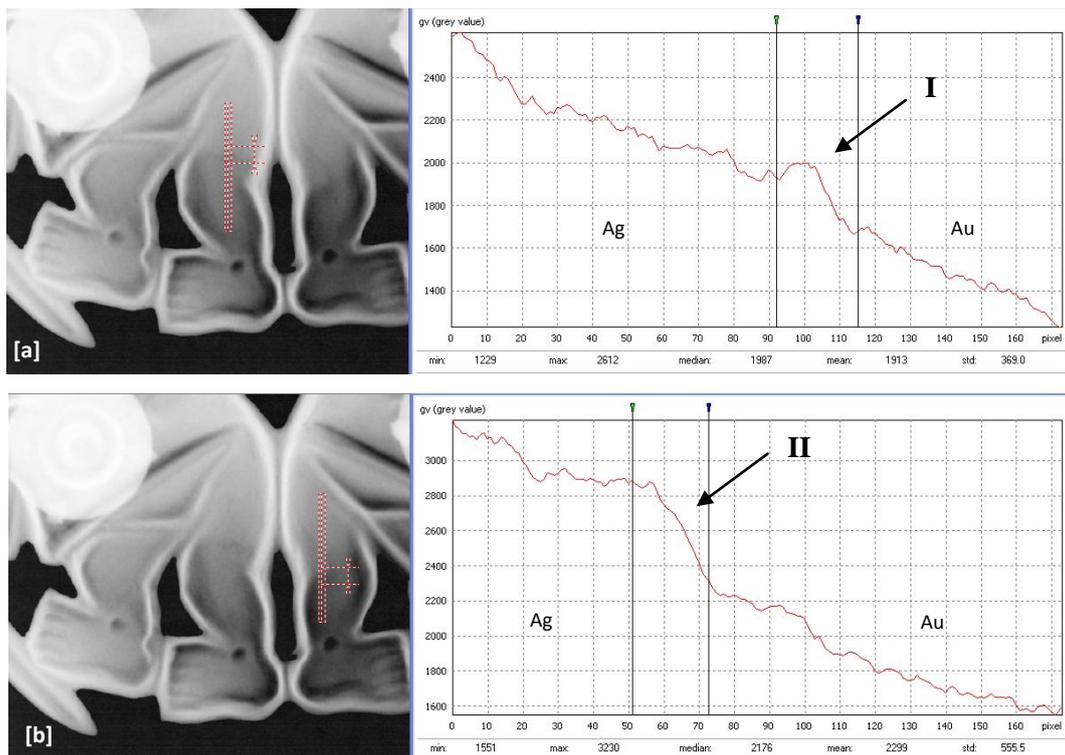


Figura 4.10. Radiografias digitais da peça decorativa PD01 e os perfis de linha do nível de cinza por pixel das regiões destacada em [a] e [b], respectivamente.

#### 4.2.2 Peça Decorativa PD02

A fotografia da peça decorativa PD02 (Figura 4.11), mostra um formato retangular do ornamento e os metais prata e ouro soldados diagonalmente e sementes fixadas sobre a mesma.



Figura 4.11. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD02.

As Figuras 4.12-a e 4.12-b mostram as radiografias do lado esquerdo superior da peça, adquiridas com 50 kV-79  $\mu$ A, sem filtro de aumento de detalhes e com filtro, respectivamente. Nessas imagens radiográficas é possível visualizar a sobreposição do ouro com a prata, como indicada por setas.

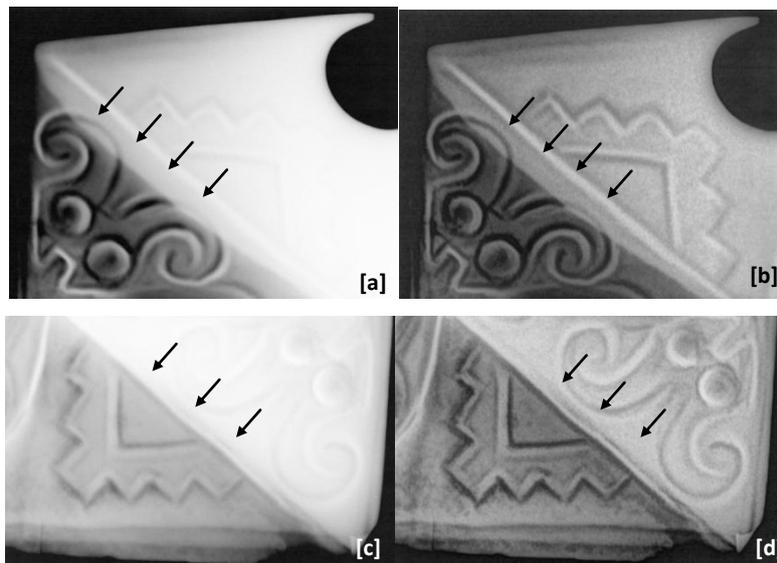


Figura 4.12. Imagens radiográficas do lado esquerdo superior da peça decorativa PD01, [a] sem filtro de processamento de imagem e [b] com filtro; e do lado direito inferior, [c] sem filtro de processamento de imagem e [d] com filtro.

As Figuras 4.12-c e 4.12-d mostram as radiografias do lado direito inferior do ornamento, também adquiridas com 50 kV-79  $\mu$ A. Já nessas imagens não aparece a sobreposição dos metais, há uma separação bem marcada das regiões da prata e ouro, indicadas pelas setas.

Na Figura 4.13 é mostrada a radiografia digital de uma parte da peça PD02 e o perfil de linha do nível de cinza por *pixel* da região destacada na imagem radiográfica, no sentido da área de prata (parte inferior triangular) para a área de ouro (parte triangular superior), com a região de sobreposição prata-ouro destacada no perfil. Pelo perfil, na região da prata há um decréscimo gradual do nível de cinza até chegar a área

de sobreposição. A área de sobreposição dos metais é bem definida no perfil, também com uma diminuição gradual do sinal no sentido da área do ouro e a região de ouro não houve diferença significativa nos valores de cinza, fato que pode ter ocorrido pela alta atenuação da radiação, não obtendo assim muita informação. Ao verificar a fotografia (Figura 4.11), juntamente com a radiografia (Figura 4.13), conclui-se que a extremidade da folha de ouro foi posicionada abaixo da de prata. A evidência do processo de soldagem dessa peça é de que tenha sido realizado primeiramente por martelamento das extremidades das folhas de ouro e prata, posterior junção destas e aquecimento. Quanto há diminuição do nível de cinza na região da prata e na região intermediária, leva a evidência de que há uma diminuição da espessura da prata e aumento da de ouro (analisando sempre no sentido para a área de ouro) e também uma interdifusão atômica, de átomos de prata para a região de ouro e vice-versa. Na área de ouro não houve sinal suficiente para análise.

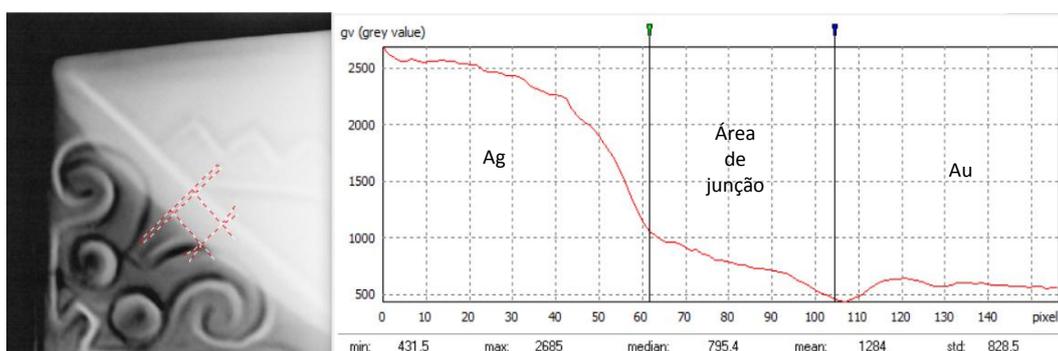


Figura 4.13. Radiografia digital da peça decorativa PD02 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região destacada na imagem.

### 4.2.3 Peça Decorativa PD03

Na Figura 4.14 são mostradas duas fotografias da peça decorativa PD06, frente e verso, respectivamente. A peça apresenta em prata uma figura aparentemente humana

no centro em prata e entorno duas figuras, em cada lado de um animal, em ouro. Na parte superior, contem umas pequenas chapas circulares de prata, fixadas na peça por argolas de ouro.



Figura 4.14. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD03, [a] frente e [b] verso.

Nas Figuras 4.15-a e 4.15-b, são mostradas imagens radiográficas da região central da peça PD03, área somente de prata, sem filtro de aumento de detalhes e com filtro, respectivamente. Para a aquisição da imagem radiográfica dessa área foi utilizado 50 kV-79  $\mu$ A. Na imagem com filtro, é possível visualizar com mais detalhes que a estrutura apresenta heterogeneidade na região da perna da figura, supondo uma modelagem manual por martelamento ou uma mistura com outros materiais.

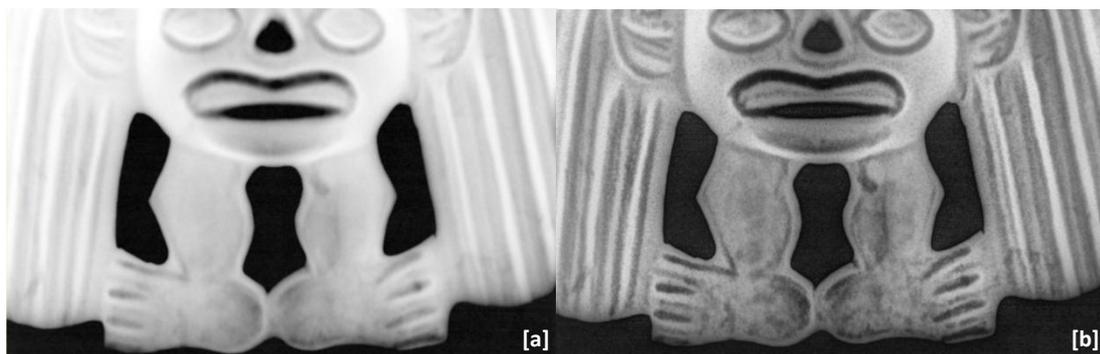


Figura 4.15. Imagens radiográficas digitais da região central da peça PD03, [a] sem filtro de aumento de detalhes e [b] com filtro.

A radiografia mostrada na Figura 4.16-b (adquirida a 50 kV-79  $\mu$ A) foi obtida para verificar se a camada de prata sobre a de ouro (visível na fotografia, como indicada na Figura 4.16-a) poderia ser visualizada. Pela análise radiográfica, a camada de prata não obteve contraste suficiente para ser distinguido sobre a base de ouro.

A evidência é de que ocorreu o processo de soldagem, sem sobreposição das folhas metálicas, somente com a junção dessas e posterior aquecimento. Assim, a folha de prata ao chegar ao processo de fusão, uma fina camada deslizou para a parte de ouro.

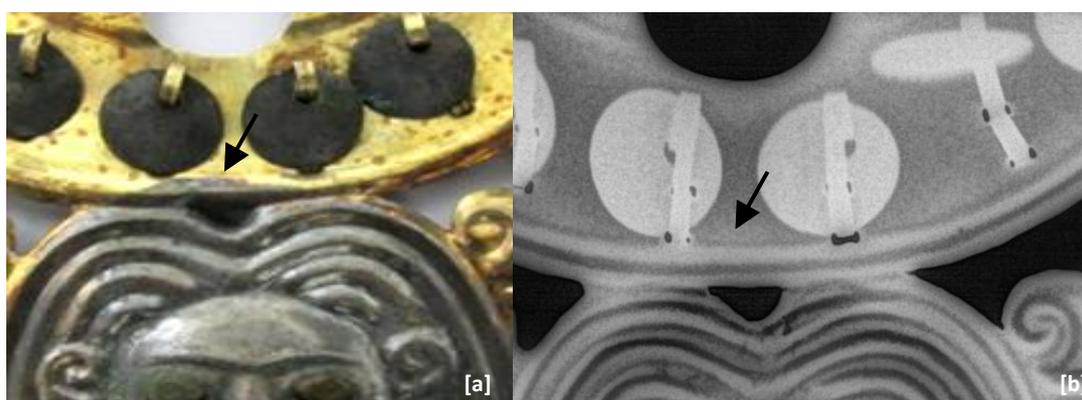


Figura 4.16. Imagens [a] fotográfica e [b] radiográfica da peça decorativa PD03, indicando uma camada de prata vista na fotografia, mas que não foi detectada na radiografia.

As Figuras 4.17-a e 4.17-b mostram as radiografias e seus respectivos perfis de linha (valor de cinza por *pixel*) das regiões de interseção prata-ouro, correspondendo ao cabelo da figura humana (de prata) e a boca do animal (de ouro). Para a aquisição dessas imagens radiográficas foi utilizado 50 kV-79  $\mu$ A. Analisando os dois perfis de linha, das regiões destacadas na imagem (sentido da região de prata para o ouro), verifica-se que não é bem definida a região de junção dos dois metais e que a região de prata, em média tem um nível de cinza muito próximo da área de ouro nos pontos indicados pelas setas, enquanto que nos pontos I e II (da Figura 4.17-a) e, III e IV (da Figura 4.17-b), tem valores de cinza superiores às da área de ouro, indicando uma diminuição de espessura do material. Desta maneira, é uma região bastante complexa de

análise devido à diferenças de espessuras produzidas pela modelagem do cabelo, obtendo diferenças significativas nos valores de cinza. Porém, quanto a questão de alguns pontos da área de prata apresentarem valores de cinza próximos aos da área de ouro, a hipótese é que foi empregado o procedimento de utilizar uma folha única da prata e realizar posteriormente um processo de douramento nesta liga, em áreas aparentadas como ouro (CESAREO, 2016).

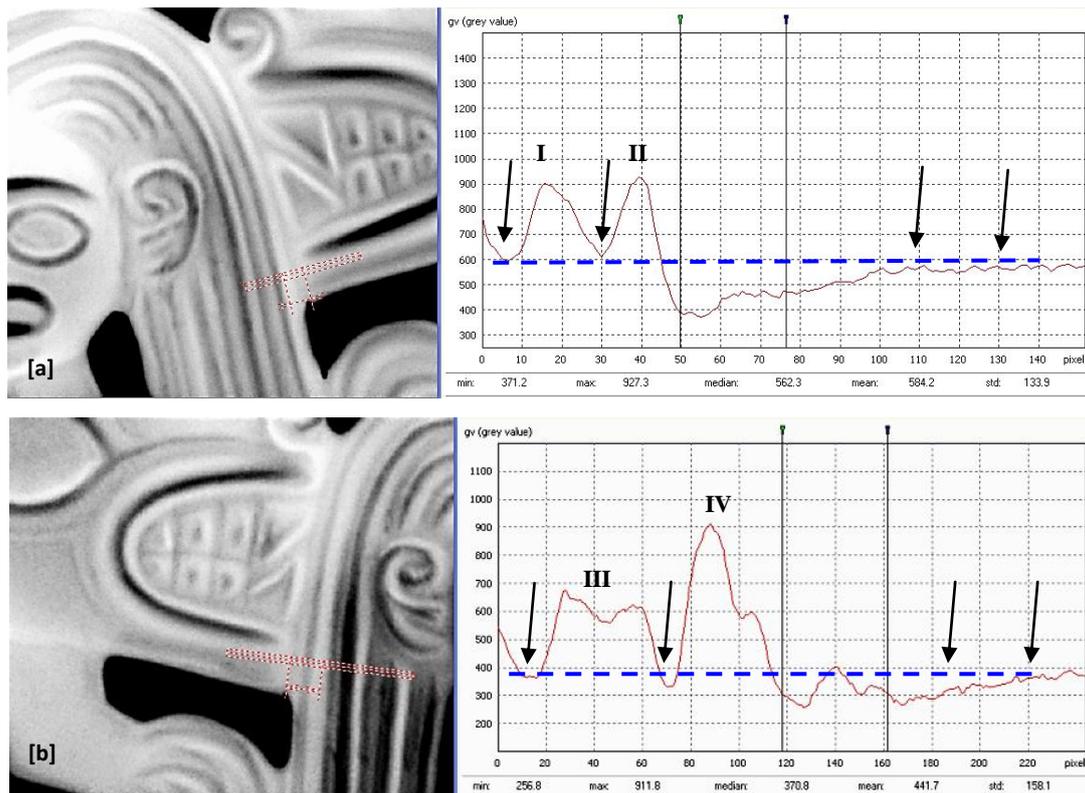


Figura 4.17. Radiografias digitais da peça decorativa PD03 e os perfis de linha do nível de cinza por pixel das regiões destacadas na imagem [a] do lado direito e [b] esquerdo do ornamento.

#### 4.2.4 Peça Decorativa PD04

A Figura 4.18 mostra a fotografia da peça decorativa PD04, composta por duas figuras simétricas aparentemente de cobras, com parte do corpo em prata e outra em ouro.



Figura 4.18. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD04.

As Figuras 4.19-a e 4.19-b mostram radiografias da peça PD04, das regiões das cabeças esquerda e direita da figura da cobra, respectivamente, apresentando os dois metais bastante homogêneos (não dando indício que as folhas metálicas tenham sofrido algum processo de martelamento durante a moldagem). As Figuras 4.19-c e 4.19-d apresentam uma radiografia e fotografia, respectivamente, de uma região de junção prata-ouro, como destacada na imagem. Nessa área destacada e indicada por uma seta, é possível visualizar uma sobreposição dos dois tipos de metais, ou seja, na fotografia vê-se a prata, mas na radiografia é possível visualizar uma região mais clara bem definida, indicando a presença de folha de ouro por baixo da folha de prata.

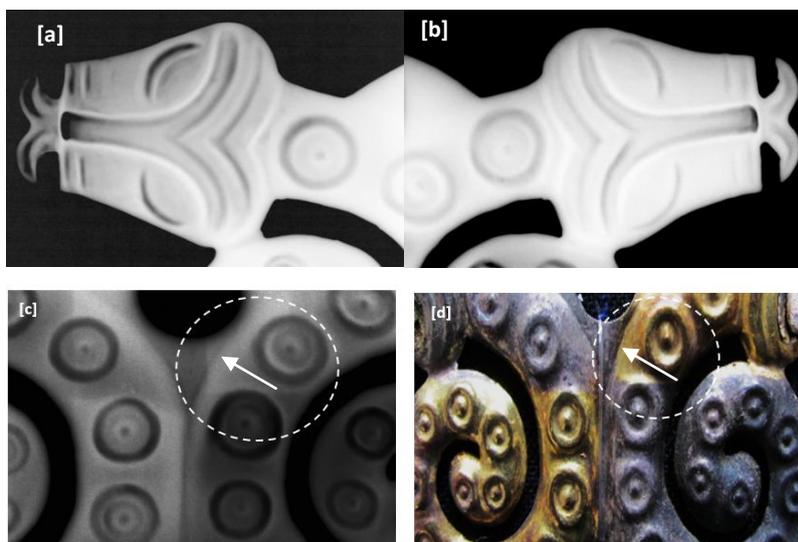


Figura 4.19. Imagens radiográficas digitais da peça decorativa PD04, [a] mostrando a região da cabeça esquerda e [b] direita do animal; [c] região central, indicando uma área de junção prata-ouro e [d] a fotografia da peça indicando a mesma região de “c”.

Foi analisado o perfil de linha de duas regiões de interseção prata-ouro da peça PD04, como mostrado na Figura 4.20-a e 4.20-b, sempre no sentido da prata para o ouro. No perfil da Figura 4.20-a, as regiões de prata e ouro, não apresentam diferenças significativas nos valores de cinza como visto, por exemplo, no perfil da Figura 4.13 (na área de prata).

Na área central, região da junção prata-ouro, apresenta um declínio gradual do nível de cinza no sentido da parte de ouro, a evidência é de que tenha ocorrido a diminuição da espessura da prata e aumento da de ouro. O mesmo ocorre na região de interseção do perfil de linha da Figura 4.20-b. Na área de prata do perfil da Figura 4.20-b, apresenta uma variação de nível de cinza, indicando uma variação de espessura na região.

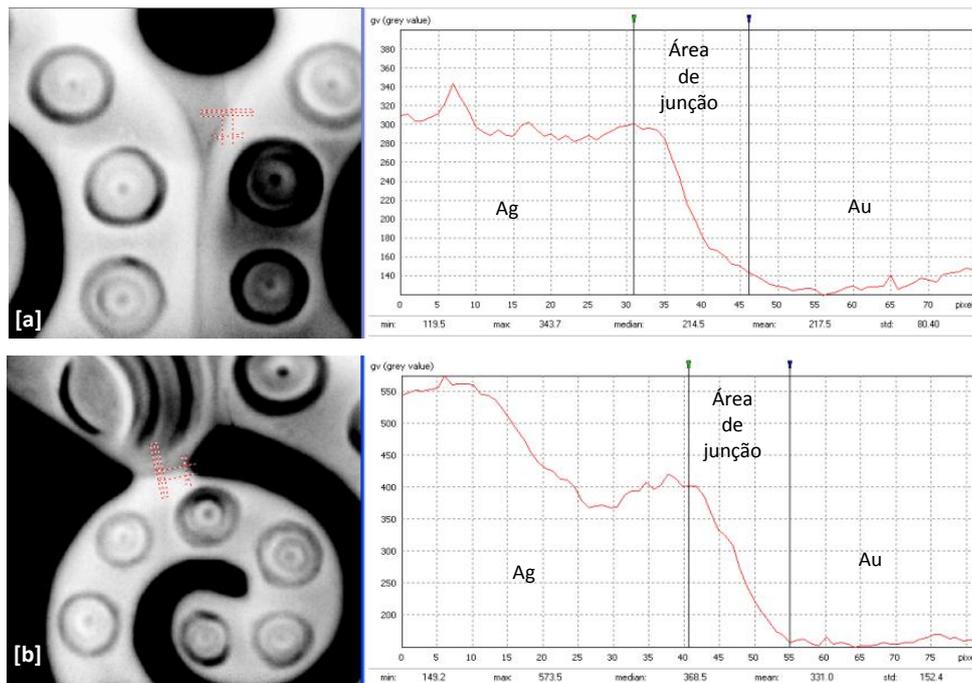


Figura 4.20. Radiografias e perfis de linha (valor de cinza por pixel) de regiões de junções prata-ouro da peça PD04, destacadas nas imagens, [a] região central e [b] área da cabeça e corpo.

#### 4.2.5 Peça Decorativa PD05

A Figura 4.21 mostra duas fotografias da peça decorativa PD05, frente e verso, respectivamente. Esse ornamento é formado por duas figuras simétricas de “soldados”, ambos segurando uma “lança”. A parte superior é formada de prata e a região inferior, de ouro.



Figura 4.21. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD05 [a] frente e [b] verso.

As Figuras 4.22-a e 4.22-e são radiografias da cabeça e “cajado” das figuras dos “soldados” à esquerda e direita, respectivamente, da peça decorativa PD05, adquiridas a 25 kV-100  $\mu$ A, onde somente é possível observar com maiores detalhes as regiões de prata.

As Figuras 4.22-b e 4.32-f são radiografias das mesmas regiões anteriores, respectivamente, porém capturadas com 50 kV-79 $\mu$ A, para visualizar detalhes de ouro e nas regiões de prata ocorreram quase nenhuma atenuação do feixe de radiação (saturação do sinal). Nas Figuras 4.22-c e 4.22-d, são possíveis observar algumas trincas na parte superior de prata.

A Figura 4.22-g é uma região do corpo dos “soldados” onde é possível visualizar a região de ligação entre o ouro e a prata, indicada pelas setas.

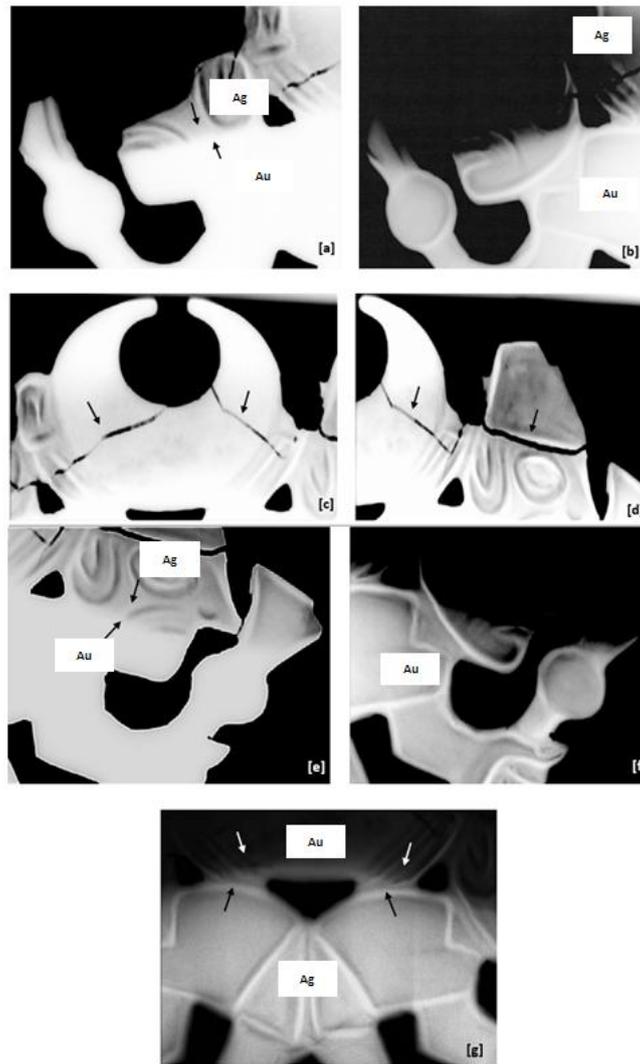


Figura 4.22. Imagens radiográficas digitais da peça decorativa PD05. Indicadas regiões de prata e ouro e algumas descontinuidades (fissuras).

Nas Figuras 4.23-a e 4.23-b são mostradas as análises de regiões de junção prata-ouro (como destacadas na figura) pelos perfis de linha (nível de cinza por *pixel*). Nos dois casos (como aconteceu na PD02), há uma diminuição do nível de cinza na região da prata e na região intermediária, levando a evidência de que há uma diminuição da espessura da prata e aumento da de ouro (analisando sempre no sentido para a área de ouro) e também uma interdifusão atômica, de átomos de prata para a região de ouro e vice-versa. Na área de ouro não houve sinal suficiente para análise.

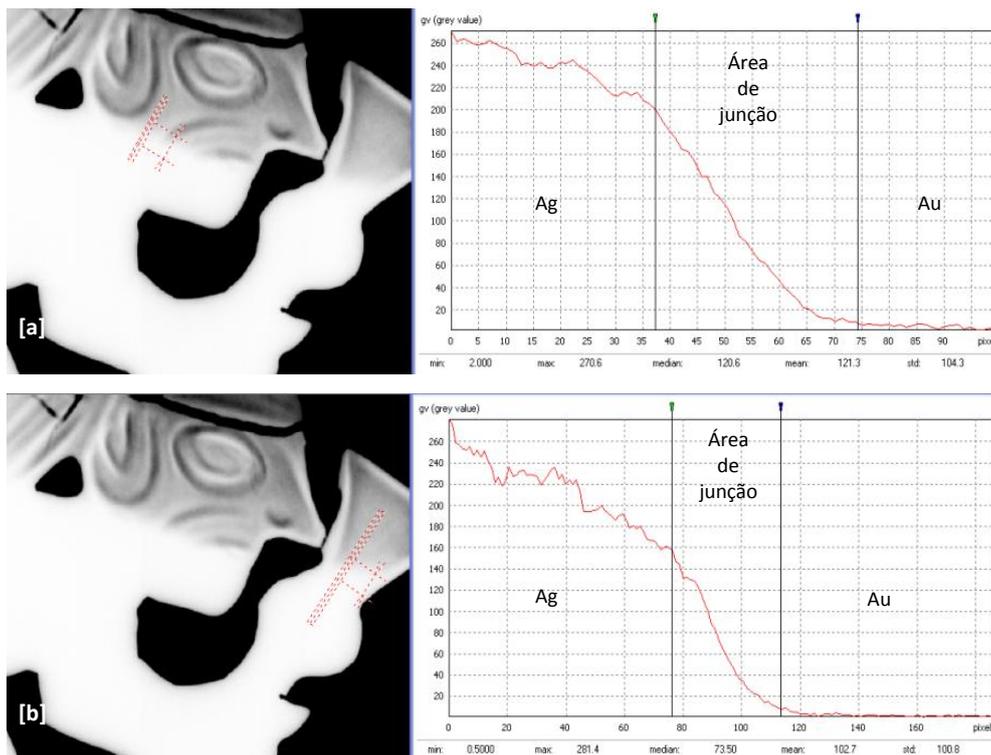


Figura 4.23. Radiografias e perfis de linha (valor de cinza por pixel) de regiões de junções prata-ouro da peça decorativa PD05, destacadas nas imagens, [a] região da cabeça e [b] região da “lança”.

Para uma análise estrutural com campo de visão mais amplo da região de junção prata-ouro, foi obtida uma imagem de dupla energia (pela técnica de múltipla energia), utilizando as radiografias adquiridas a 25 e 50 kV (Figura 4.24-a e 4.24-b).

A Figura 4.24-c é a imagem de dupla energia da região que corresponde a cabeça do soldado e “lança”. Nessa, é possível visualizar a estrutura da junção entre a parte de prata (região superior) e de ouro (parte inferior), verificando que há uma aparente diminuição da espessura da folha de ouro ao se aproximar da folha de prata, reforçando a evidência já explicada no parágrafo anterior, de soldagem por martelamento das extremidades das folhas de prata de ouro e posterior aquecimento e o fenômeno de interdifusão.

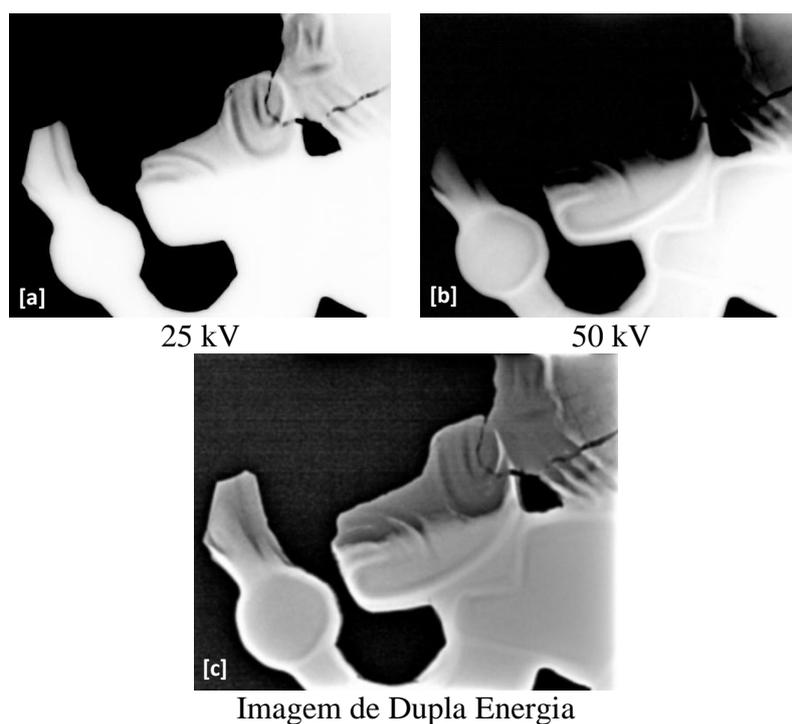


Figura 4.24. Imagens radiográficas da peça PD05, adquiridas [a] a 25 kV, [b] a 50 kV e [c] imagem obtida pela técnica de dupla energia, a partir das imagens “a” e “b”.

#### 4.2.6 Peça Decorativa PD06

A Figura 4.25 mostra duas fotografias da peça decorativa PD06, frente e verso, respectivamente. A peça apresenta em prata cinco figuras de cabeças, aparentemente de homens da época, e todo o contorno em ouro.

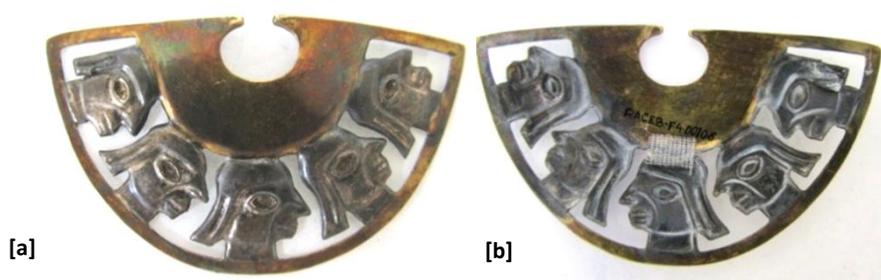


Figura 4.25. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD06 [a] frente e [b] verso.

Figura 4.26-a a 4.26-d são imagens radiográficas adquiridas com 25 kV-100  $\mu$ A. A Figura 4.26-a é uma imagem radiográfica que se pode observa uma trinca no pescoço da figura humana e uma “soldagem” nos cabelos (essa soldagem aparenta ter sido realizada por técnicos do *Museo Cao* recentemente).

Figura 4.26-b são indicadas regiões de intercessão entre o ouro e a prata, na região do pescoço da figura humana. Figura 4.26-c indicam algumas descontinuidades da região de soldagem entre o ouro e a prata, dando evidências de que tenha ocorrido algum desgaste devido ao processo de martelamento das folhas dos metais nas extremidades). Figura 4.26-d indica mais nitidamente regiões de intercessão entre o ouro e a prata.

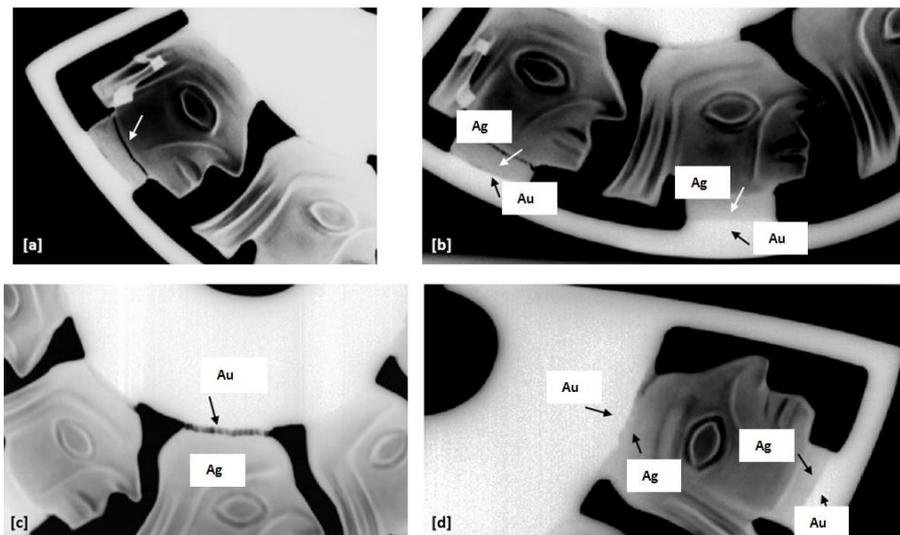


Figura 4.26. Imagens radiográficas da peça decorativa PD06. Indicações das regiões de interseção prata-ouro.

O perfil de linha do nível de cinza por *pixel* da radiografia (adquirida a 50 kV-79  $\mu$ A) da região destacada, mostrado na Figura 4.27, não há uma posição definida que caracterize as regiões de prata, junção e ouro, respectivamente. No perfil é destacado a área aproximada da região de convergência prata-ouro, o lado esquerdo dessa demarcação é a região da prata, na qual há uma diminuição gradual do nível de cinza no sentido da junção, podendo ter ocorrido uma sobreposição dos metais da prata ou difusão de átomos de ouro (ou outro material que tenha sido utilizado como solda).

No lado direito do perfil há um efeito contrário, ou seja, um aumento do nível de cinza ao se aproximar da interseção, dando evidências de que houve um processo de soldagem por martelamento dos metais sobrepostos e/ou uma difusão intermetálica (fluxo de átomos de prata para o metal ouro). Esses processos de soldagem também foram evidenciados nas peças PD02 e PD05.

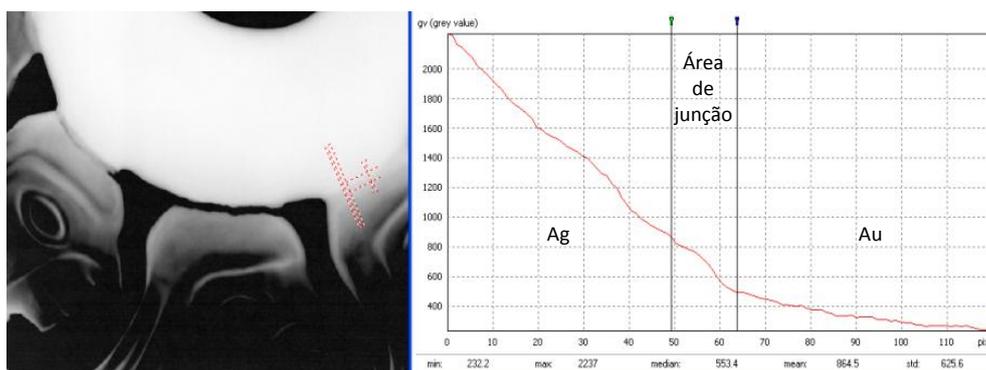


Figura 4.27. Radiografia digital da peça decorativa PD06 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.

A Figura 4.28 mostra o perfil de linha do nível de cinza por *pixel* da região destacada na imagem radiográfica (adquirida a 25 kV-100  $\mu$ A). Este perfil, diferente da anterior, apresenta uma marcação mais definida das regiões prata-junção-ouro. Quanto a área de ouro obteve um sinal muito baixo, devido a espessura desse metal nessa região, que proporcionou uma alta atenuação do feixe de raios X para a energia utilizada. O decaimento de sinal da prata no sentido da junção, recorre a mesma explicação do perfil

anterior. A região central do perfil, pode ter ocorrido uma diminuição da espessura da prata e aumento da de ouro, devido à uma sobreposição de folhas de prata-ouro e o fenômeno de interdifusão atômica, como já observado no perfil anterior, de uma outro área da peça.

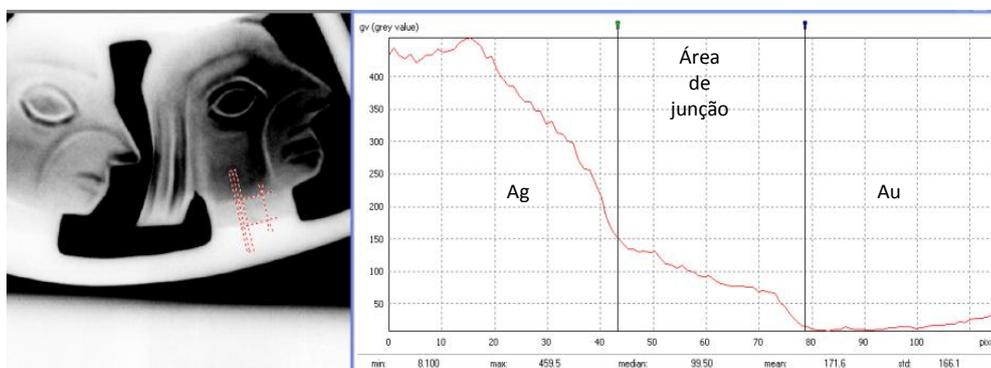


Figura 4.28. Radiografia digital da peça decorativa PD06 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.

#### 4.2.7 Peça decorativa PD07

A Figura 4.29 mostra duas fotografias da peça decorativa PD07, frente e o verso, respectivamente. A peça apresenta duas figuras simétricas de um animal em ouro e uma borda inferior em toda figura em prata.



Figura 4.29. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD07 [a] frente e [b] verso.

As Figuras 4.30-a 4.30-b mostram as radiografias digitais da PD07, sem e com filtro de aumento de detalhes, respectivamente. A imagem radiográfica foi capturada com 50 kV-79  $\mu$ A. A imagem radiográfica permitiu a visualização de detalhes entre a junção das regiões de ouro (parte superior da imagem) e prata (parte inferior da imagem).

A área que constitui a prata apresenta uma heterogeneidade do material, supondo alguma porosidade (processo que pode ocorrer devido a fusão) ou misturas com um material diferente. Na região de junção, a borda de ouro apresenta algumas irregularidades, mas bem definidas em comparação com junções vistas em outras narigueiras.

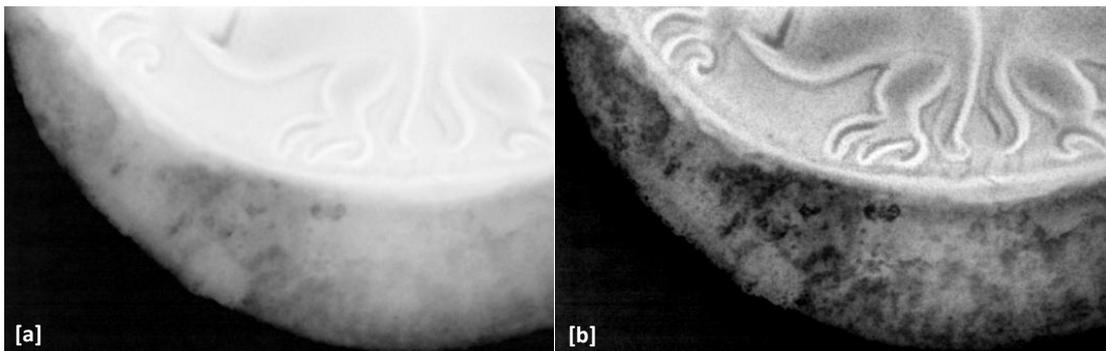


Figura 4.30. Radiografia digital da peça decorativa PD07 [a] sem filtro e [b] com filtro de aumento de detalhes, mostrando a parte de junção entre as regiões de ouro e prata.

Na Figura 4.31 são mostradas três radiografias adquiridas com feixes de raios X com diferentes energias (a- 25, b- 40 e c- 50 kV) e a imagem radiográfica (Figura 4.31-d) obtida a partir dessas três anteriores pela técnica de imagem de múltipla energia. A escolha de realizar essa técnica nessa região da peça foi para observar toda a borda de prata ao longo do seu encontro com o ouro, caracterizando a estrutura por completa da

junção prata-ouro.

A utilização de diferentes energias do feixe de raios X, permitiu obter diferentes atenuações da radiação no material, capturando com um bom contraste várias espessuras da peça, sem a perda de alguma parte. Na imagem da Figura 4.31-d, é possível observar variações de espessuras da prata até o encontro com a região de ouro. Essa técnica é uma das possibilidades de processamento das imagens oferecidas pela radiografia digital.

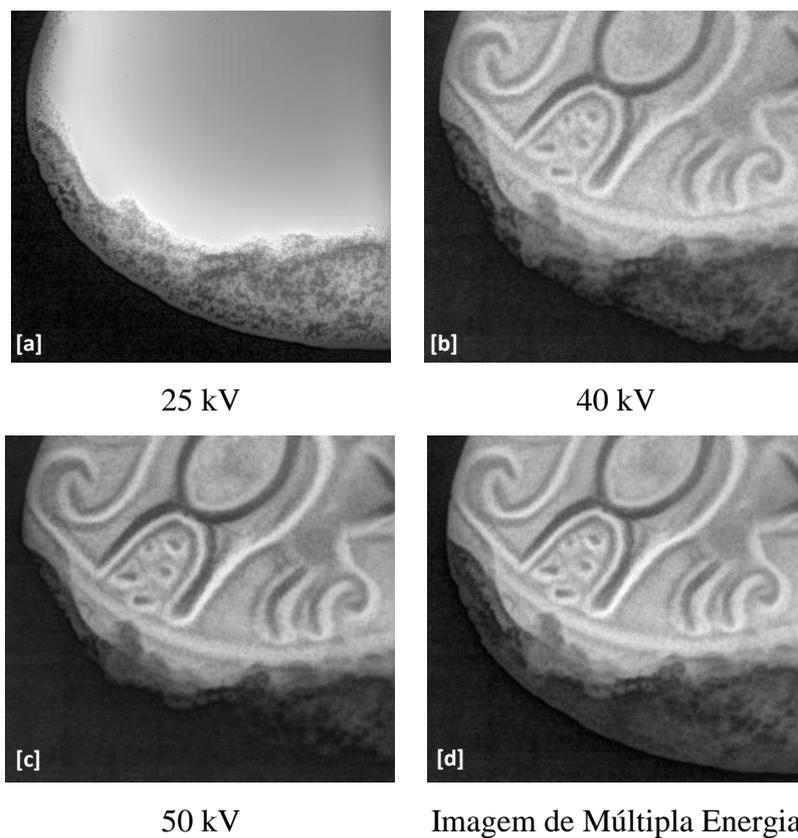


Figura 4.31. Radiografias digitais da peça decorativa PD07 adquiridas a [a] 25, [b] 40, [c] 50 kV e [d] imagem processada com as três energias anteriores.

Na Figura 4.32 é mostrado o perfil de linha do nível de cinza por *pixel* da região de junção prata-ouro destacada na imagem. A área de interseção dos dois metais é indicada no gráfico, apresentando uma diminuição gradual dos valores de cinza no sentido prata-ouro, já explicado em outras peças. Na região da prata há um decréscimo do nível de cinza até a área de junção (já explicado também nas peças anteriores, nas quais ocorreu o mesmo caso). Na região do ouro não houve variação significativa do número de cinza, esse fato pode ser devido a energia do feixe de radiação não ter sido suficiente para espessura de ouro da região analisada. Por essa análise radiográfica, as evidências são de que a prata tenha sofrido um processo de fusão e a extremidade da folha de ouro que está em contato com a prata, tenha sofrido o processo de martelamento e posterior aquecimento.

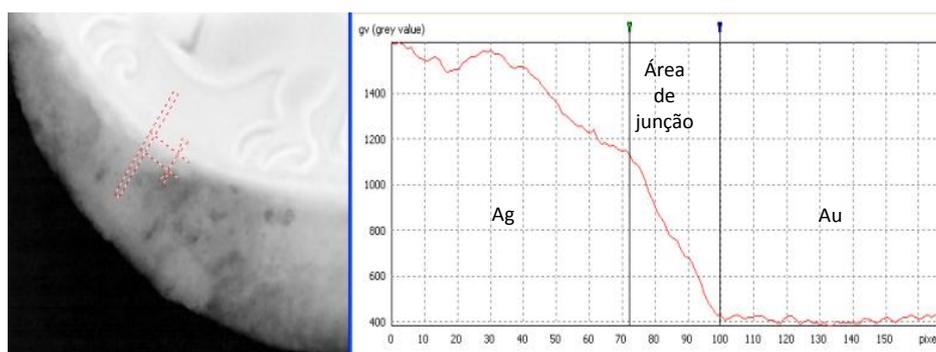


Figura 4.32. Radiografia digital da peça decorativa PD07 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.

#### 4.2.8 Peça decorativa PD08

A Figura 4.33 mostra uma fotografia da PD08, modelada com uma figura de um “rei”, com duas aparentes cobras, uma de cada lado. O ornamento é constituído de uma região de ouro na parte superior e prata na inferior.



Figura 4.33. Fotografia da peça decorativa arqueológica PD08, apresentando dois tipos de metal, prata e ouro.

A principal região analisada foi a da junção prata-ouro, onde foi traçado um perfil de linha (Figura 4.34). Neste perfil é identificado a região de transição prata-ouro, onde há um decréscimo gradativo do número de cinza, no sentido da região de ouro. Como em outras narigueiras analisadas, a suposição também seja de que nessa peça tenham realizado o processo de soldagem por sobreposição de folhas de ouro e prata e posterior aquecimento.

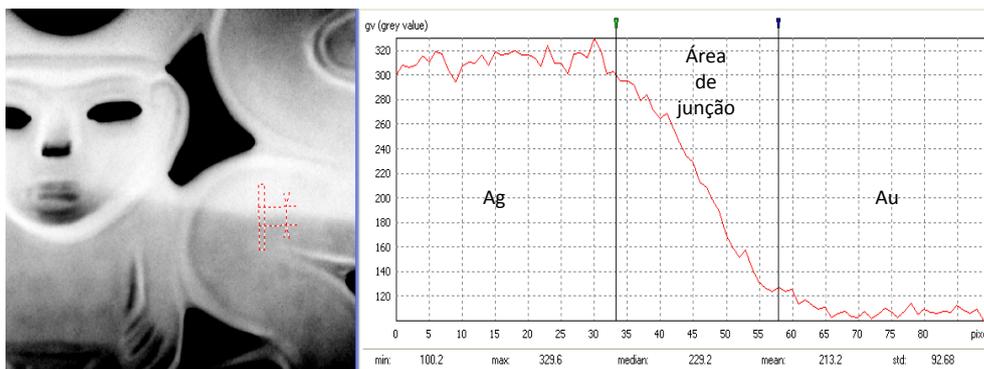


Figura 4.34. Radiografia digital da peça decorativa PD08 e o perfil de linha do valor de cinza por pixel na região de junção prata-ouro, destacada na imagem radiográfica.

Ao realizar a análise numa região mais estendida (Figura 4.35), onde o perfil de linha (da região de prata para o ouro) apresenta uma queda gradual do sinal da prata e ouro, no sentido da área de interseção, supondo um aumento de espessura dos dois metais ao se aproximarem da junção. SCHORSCH (1998) supôs que bordas de folhas de ouro e prata seriam inicialmente sobrepostas, posteriormente submetidas a alta temperatura e pequena pressão, até ocorrer uma difusão entre os dois metais. SCHORSCH (1998) ainda observou que as folhas de metal usadas para o ornamento de nariz são bastantes finas, medindo cerca de 0,2 milímetro perto da junção, enquanto o metal na junta é quase duas vezes mais espesso. Isto pode explicar o fato do nível de cinza diminuir (para nos dois metais) ao se aproximarem da junta (Figura 4.35).

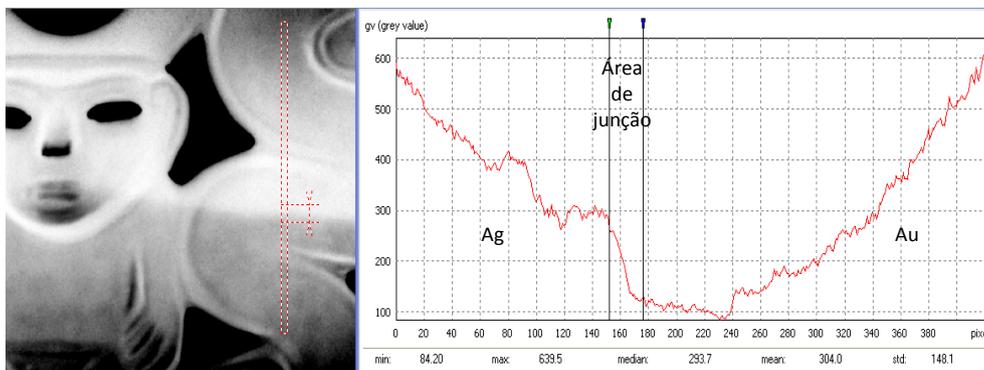


Figura 4.35. Radiografia digital da peça decorativa PD08 e o perfil de linha do valor de cinza por pixel na região de junção prata-ouro, destacada na imagem radiográfica, indicando um aumento de espessura dos dois metais ao se aproximarem da junção prata-ouro.

A Figura 4.36 mostra a radiografia digital e fotografia da peça decorativa PD08, respectivamente. Na radiografia é destacada com uma linha tracejada a região de interseção prata-ouro e uma área de sobreposição (destacado com setas) dos metais, com um pouco do metal ouro abaixo da prata, como dito no parágrafo anterior.

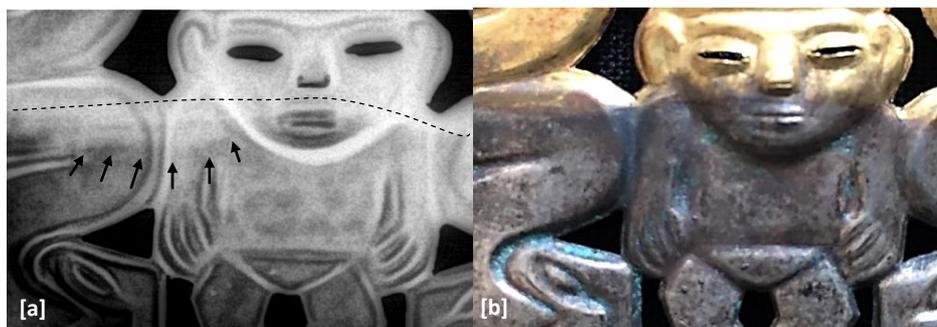


Figura 4.36. Radiografia digital e fotografia da peça decorativa PD08, respectivamente. Na radiografia é destacada com uma linha tracejada a região de interseção prata-ouro e uma área de sobreposição dos metais.

#### 4.2.9 Peça decorativa PD09

Na Figura 4.37 é mostrada duas fotografias da peça decorativa PD09, frente e verso, respectivamente. Constitui de duas figuras simétricas com aparência de uma espécie de lagarto. A parte superior da joia é formada com metal ouro e a inferior, com prata.



Figura 4.37. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD09, [a] frente e [b] verso.

Foram adquiridas radiografias de duas regiões de interesse, o lado direito da peça (Figura 4.38-a) e a parte central (Figura 4.38-b). As imagens das Figuras 4.38-c e 4.38-d, são as radiografias das Figuras 4.37-a e 4.37-b, porém com filtro de aumento de detalhes, obtidas pelo programa de processamento de imagem. Nessas duas últimas, estão indicadas por setas, regiões onde é possível observar, na área de convergência, uma sobreposição de folhas de ouro e prata e um processo de interdifusão atômica.

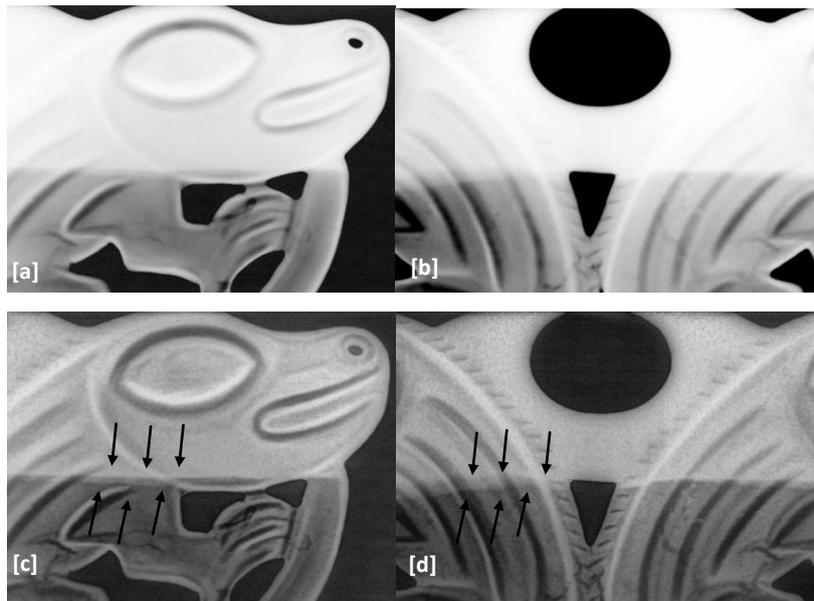


Figura 4.38. Radiografias da peça decorativa arqueológica PD09 [a] da área central, [b] imagem radiográfica de a e [d] imagem radiográfica de b, com filtro de aumento de detalhes.

O perfil de linha da Figura 4.39, numa região de interseção prata-ouro, não há uma posição um pouco mais definida caracterizando as regiões de prata, da área da junção e ouro. Reafirmando, como mencionado anteriormente, a sobreposição dos metais, devido a técnica de soldagem por martelamento, aquecimento e interdifusão das partículas de ambos.

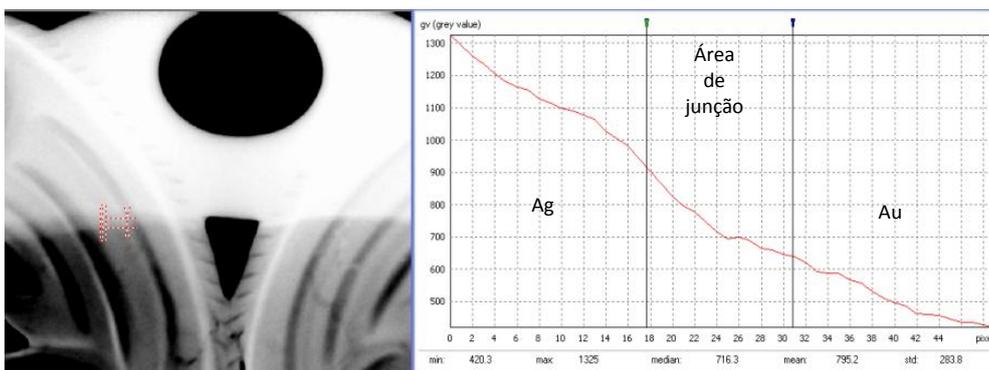


Figura 4.39. Radiografia digital da peça decorativa PD09 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.

#### 4.2.10 Peça decorativa PD10

A peça decorativa PD10 é mostrada na Figura 4.40, frente e o verso, respectivamente. A peça apresenta duas figuras simétricas de uma espécie de cobra com duas cabeças, uma de ouro e outra de prata, e uma moldura quase circular no meio, onde ocorreu a soldagem entre esses metais.



Figura 4.40. Fotografias da peça decorativa arqueológica PD10 [a] frente e [b] verso.

A Figura 4.41, mostra uma radiografia digital da PD10 obtida a 50 kV-79  $\mu$ A, sem filtro e com filtro de aumento de detalhes, respectivamente. A imagem radiográfica permitiu a visualização das regiões de ouro (lado esquerdo da imagem) e prata (lado direito).

Na área que constitui a prata, é possível visualizar uma heterogeneidade do material, sendo interpretada como variações de espessuras, com evidências de que essa folha de prata sobre um processo de martelamento. Essa técnica consistia na soldagem dos metais por martelamento de folha de prata e ouro sobrepostas nas extremidades e posterior aquecimento, antes de serem moldadas.

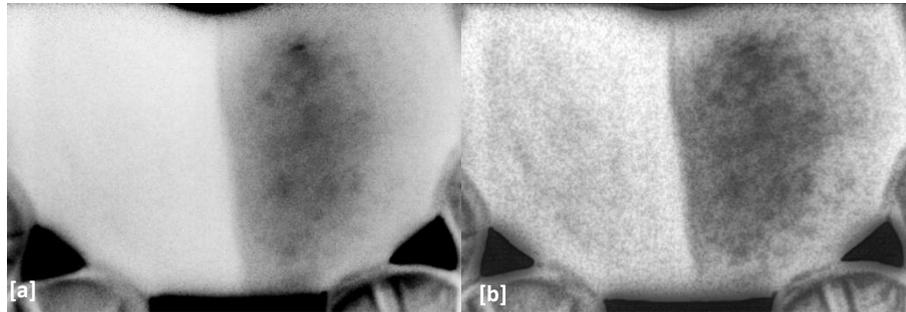


Figura 4.41. Radiografia digital da peça decorativa PD10 [a] sem filtro e [b] com filtro de aumento de detalhes, mostrando a parte de junção entre as regiões de ouro e prata.

Na Figura 4.42 é mostrado o perfil de linha do nível de cinza por *pixel* da região de junção prata-ouro destacada na imagem. A área de interseção dos dois metais é destacada no gráfico, apresentando uma diminuição gradual dos valores de cinza no sentido prata-ouro. A interpretação desse perfil pode ser considerada a mesma da peça PD02, PD05 e PD07.

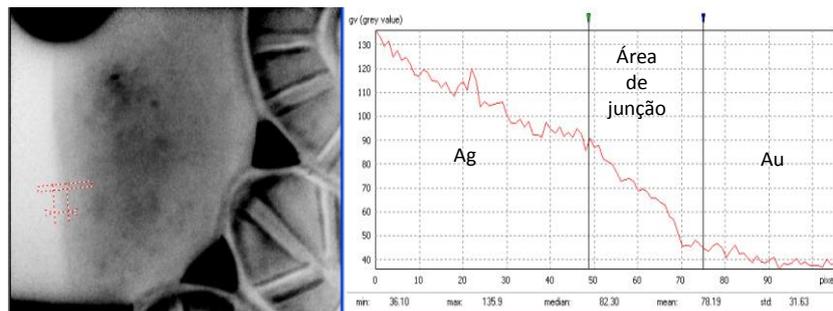


Figura 4.42. Radiografia digital da peça decorativa PD10 e o perfil de linha do nível de cinza por pixel da região prata-ouro destacada na imagem.

## 5 CONCLUSÕES

Os testes de caracterização do sistema radiográfico, elaborados e realizados, foram importantes para obtenção de informações quanto ao seu desempenho em condições aproximadas das que seriam utilizadas no processo de inspeção das peças arqueológicas. Desta maneira, essa prática proporciona conhecimentos prévios das capacidades e limitações do sistema, em relação aos parâmetros medidos, auxiliando na verificação da viabilidade ou não de utilizar determinado sistema radiográfico para uma prática radiográfica específica. Os testes de caracterização de MTR e CS, por exemplo, podem ser efetuados com outros materiais, iguais ou próximos aos que serão inspecionados.

As imagens radiográficas digitais da junção entre prata e ouro das peças decorativas de nariz, metalurgias da tumba de "Senhora de Cao" do *Museo Cao* (no Peru), foi importante para a compreensão da técnica de soldagem Moche. A técnica de radiografia digital com raios X, contribuiu para caracterizar as junções entre as áreas prata-ouro das metalurgias Moche. Com a técnica de múltipla energia foi possível obter um contraste dos dois metais diferentes em uma única imagem, para uma visualização efetiva da área de junção prata-ouro das peças decorativas. A técnica de radiografia digital por raios X mostrou-se uma boa ferramenta de rápida análise para o estudo da estrutura interna das peças pela análise das imagens geradas, extremamente útil para a definição do processo técnico de manufatura.

A radiografia digital utilizando um sensor *flat panel* permitiu a avaliação instantânea do objeto, sendo um fator muito positivo e inovador na área arqueológica, com mais simplicidade e tempo de aquisição da prática bastante reduzida em relação a técnica de radiografia de filme, tendo essa a desvantagem do tempo, tanto de exposição quanto do processo de revelação do filme.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVA, W., DONNAN, C. B., “The Royal Tomb of Sipán”, In: *Los Angeles Fowler Museum of cultural history*, University of California, Los Angeles, 1993.
- ALVA, W., SIPAN, “Descubrimiento y Investigación, Quebecor World Peru S.A”, Lima, 2004.
- ASME Section V, Article 2 - NDT - Non Destructive Examination.
- ASTM E2597-07, Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Arrays, January, 2008.
- ASTM E2698-10, Standard Practice for Radiological Examination Using Digital Detector Arrays, July, 2010.
- ASTM E2736-10, Standard Guide for Digital Detector Array Radiology, July, 2010.
- ASTM E2737-10, Standard Practice for Digital Detector Array Performance Evaluation and Long- Term Stability, June, 2010.
- ASTM E1025-11, Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology, January, 2012.
- ASTM E1815-08, Standard Test Method for Classification of Film Systems for Industrial Radiography, 2013.
- ASTM E2002-15, Standard Practice for Determining Total Image Unsharpness and Basic Spatial Resolution in Radiography and Radioscopy, 2015.
- BUSHONG, S. C. *Ciência, Radiológica para Tecnólogos: Física, Biologia e Proteção*. Tradução da 9ª edição, Elsevier Editora Ltda., São Paulo, 2010.
- CALZA C., OLLIVEIRA D. F., FREITAS R. P., ROCHA H.S., NASCIMENTO J. R., LOPES R.T., “Analysis of sculptures using XRF and X-rayradiography”. *Radiation Physics and Chemistry* 116, 326-331 April 2015.
- CARTER, C. & VEALE, B., *Digital Radiography and PACS*. 2ª Edição. Elsevier. 2014. 251 p.
- CESAREO, R., JORDAN, F., FERNANDEZ, A., BUSTAMANTE, A., FABIAN, J., DEL PILAR ZAMBRANO, S., AZEREDO, S., LOPES, R. T., INGO, G. M., RICCUCCI, C., DI CARLO, G., GIGANTE, G. E., “Analysis of the spectacular gold and silver from the Moche tomb ‘Señora de Cao’”, *X-Ray Spectrometry*, 45, 138-154, 2016.

- CORREA, S. C. A., “Otimização de Dose e da Imagem Radiográfica Digital de Torax Usando Modelagem Computacional”, Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- CUEVAS, A. M., GRAVIE, H. P., “Portable energy dispersive X-ray fluorescence and X-ray diffraction and radiography system for archaeometry”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 633, 72–78 January 2011.
- DEWANCKELE, J., DE KOCK, T., FRONTEAU, G., DERLUYN, H., VONTOBEL, P., DIERICK, M., VAN HOOREBEKE, L., JACOBS, P., CNUDDÉ, V., “Neutron radiography and X-ray computed tomography for quantifying weathering and water uptake processes inside porous limestone used as building material”, *Materials Characterization* 88, 86-99 December 2013.
- EN 462-1, Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Image quality indicators (wire type). Determination of image quality value, 1994.
- EN 462-5, Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Image quality indicators (duplex wire type), determination of image unsharpness value, 1996.
- EWERT, U., ZSCHERPEL U., BAVENDIEK K., “Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: -The new high contrast sensitivity technique - Examples and system theoretical analysis”. In: *DIR - International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography*. Lyon, France, June, 2007.
- EWERT, U., ZSCHERPEL U., BAVENDIEK K., “Strategies for Film Replacement in Radiografia – Films and Digital Detectors in Comparison”. In: *17<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China, October, 2008.
- EWERT, U., ZSCHERPEL U., HEYNE C. *et al.*, “Strategies for Film Replacement”. In: *VII Hungarian NDT-Conference*, Eger, Hungary, April, 2011.
- EWERT, U., HEYNE, K., ZSCHERPEL, U. *et al.*, “Optimum Exposure Conditions for Computed Radiography Depending on Fixed Pattern Noise and Efficiency of Imaging Plate-Scanner Systems”. In: *AIP Conference Proceeding*, v. 1335, issue 1 (June), p. 493-500, San Diego, June, 2011.
- EWERT, U., ZSCHERPEL, U., JECHOW, M., “Essential Parameters and Conditions for Optimum Image Quality in Digital Radiology”. In: *18<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing*, Durban, South Africa, April, 2012.
- FIGUEIREDO, E. ARAÚJO, M. F., SILVA, R. J. C., SENNA-MARTINEZ, J. C., VAZ, I. J. L., “Characterization of Late Bronze Age large size shield nails by EDXRF, micro-EDXRF and X-ray digital radiography”, *Applied Radiation and Isotopes* 69, 1205–1211 May 2011.

- GONZALEZ R.; WOODS R., *Digital Image Processing*, Second Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA, 2002.
- ISO 19232-1, Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 1: Image quality indicators (wire type) - Determination of image quality value, 2004.
- ISO 19232-5, Non-destructive testing - Image quality of radiographs - Part 5: Image quality indicators (duplex wire type) - Determination of image unsharpness value, 2004.
- ISO 17636-2, Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors, 2013.
- JORDAN, F., “Señores de los Reinos de la Luna”, (Ed: K Makowski), *Banco de Crédito del Perú*, Lima, pp. 280–287, 2008.
- JORDAN, R. F., “Los Secretos de La Huaca Cao Viejo”, *FundacionWiese y Petrolera Transoceanica S.A.*, Lima, 2009.
- JORDAN, R. F., “Pour la Science”, Paris, France 8, pp. 390, 2010.
- JORDAN, R. F., “La Dama de Cao, in Investigacion y Ciencia”, Barcelona, Spain, pp. 68–74 2011.
- KRUPINSKI, E.A., WILLIAMS, M.B., ANDRIOLE, K. *et al.*, “Digital Radiography Image Quality: Image Processing and Display”, *Journal of the American College of Radiology*, v. 4, n. 6 (June), pp. 389-400 2007.
- LIMA, S. C., “Tecnologia Cerâmica Chimú: estudo arqueométrico da coleção do MAE/USP”, USP, 2010.
- LIMA, S.C., RIZZUTO, M. A., ADDED N., BARBOSA M.D.L., TRINDADE G.F., M.I.D.A. “Fleming. Pre-Hispanic ceramics analyzed using PIXE and radiographic techniques”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 269, 3025-3031 April 2011.
- MANNESA, D., SCHMIDA, FREYB, F. J., SCHMIDT-OTTC, K., LEHMANN, E., “Combined Neutron and X-ray imaging for non-invasive investigations of cultural heritage objects”, *Physics Procedia* 69, 653-660. *10 World Conference on Neutron Radiography*, October, 2014.
- MARCHAND, S., SHARAIHA, Y. M. *Binary Digital Image Processing - A Discrete Approach*. Academic Press. France. 2005.
- MOREIRA, E.V., FRITZ, M.C., SIMÕES, H.R. *et al.*, “Flat-panel detectors are accepted for digital radiography in place of conventional radiography in pipeline weld inspection”. In: *IV Conferência Panamericana de END*, Buenos Aires, Octubre 2007.

- MOREIRA, E. V., 2010, *Determinação da Qualidade da Radiografia Digital Aplicada às Soldas de Gasodutos e Oleodutos Terrestres e Marítimos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, F.M., 2004, *Estudo de Sistemas de Radiografia Computadorizada com Uso de Placas de Fósforos*, Dissertação o de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, D.F., 2007, *Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profundas*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, D.F., 2010, *Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PEREA, A., GUTIÉRREZ-NEIRA, P. C., CLIMENT-FONT, A., FERNÁNDEZ-ESQUIVEL, P., ROVIRA-LLORENS, S., RUVALCABA-SIL, J. L., VERDE, A., ZUCCHIATTI, A, “Pre-hispanic gold work technology. The Quimbaya Treasure, Colombia”. *Journal of Archaeological Science* 40, 2326-2334 December 2012.
- PETAROS, A., JANKOVIĆ, I.,CAVALLI, F., IVANAC, G.,BRKLJAČIĆ, B. , ČAVKA, M., “Mummified remains from the Archaeological Museum in Zagreb, Croatia e Reviewing peculiarities and limitations of human and non-human radiological identification and analysis in mummified remains”. *Journal of Forensic and Legal Medicine* 35, 54-61 July 2015.
- SCHORSCH., D., *Metropolitan Museum Journal*, 33, 109, 1998.
- SEERAM, E. *Digital Radiography: An Introduction*. Delmar, New York, 2011.
- SEIBERT, J.A., “Flat-Panel detectors: how much better are they?”, *Journal Pediatric Radiology*, v. 36, n. 9 (September), pp. 173-181, 2006.
- WATANABE, P.C.A., TANAKA, E.E., PEREIRA, M.F. *et al.*, “Estado atual da arte da imagem digital em odontologia”, *Revista APCD*, v. 53, n. 4, julho/agosto 1999.
- WILLIAMS, M.B, KRUPINSKI, E.A, STRAUSS, K.J.*et al.*, 2007, “Digital Radiography Image Quality: Image Acquisition”, *Journal of the American College of Radiology*, v. 4, n. 6 (June), pp. 371-388.

## ANEXO

A seguir estão anexados: 1 – um artigo publicado em revista internacional, 2 – um livro que está em processo de publicação e 3 – um artigo que também está para ser publicado, respectivamente. Todos esses apresentam conteúdos desta pesquisa de tese.

### 1 - Artigo publicado:

#### Research article

#### X-RAY SPECTROMETRY

Received: 20 November 2015    Revised: 11 December 2015    Accepted: 13 December 2015    Published online in Wiley Online Library: 26 January 2016

(wileyonlinelibrary.com) DOI 10.1002/xrs.2680

## Analysis of the spectacular gold and silver from the Moche tomb 'Señora de Cao'

R. Cesareo,<sup>a,e,\*</sup> R. Franco Jordan,<sup>b</sup> A. Fernandez,<sup>b</sup> A. Bustamante,<sup>c</sup> J. Fabian,<sup>c</sup> S. del Pilar Zambrano,<sup>c</sup> S. Azeredo,<sup>d</sup> R. T. Lopes,<sup>d</sup> G. M. Ingo,<sup>e</sup> C. Riccucci,<sup>e</sup> G. Di Carlo<sup>e</sup> and G. E. Gigante<sup>f</sup>

On the north coast of present-day Peru, between the Andes and the Pacific Ocean, approximately between 100 and 600 AD, the Moche civilization prospered. The Moche were very sophisticated artisans and metal smiths, so that they are considered the finest producers of jewels and artifacts of the region. Their metalworking ability was impressively demonstrated by the excavations of the tomb of the 'Lady of Cao' (dated around third–fourth century AD) discovered by Regulo Franco in 2005. Impressive is the beauty of the artifacts, and also the variety of metallurgical solutions, demonstrated by not only the presence of objects composed of gold and silver alloys but also of gilded copper, gilded silver, and tumbaga, a poor gold Cu–Au alloy subject to depletion gilding. About 100 metal artifacts from the tomb of the Lady of Cao, never before analyzed, were studied by using various portable equipments based on following non-destructive and non-invasive methods:

- energy-dispersive X-ray fluorescence with completely portable equipments;
- transmission of monoenergetic X-rays;
- radiographic techniques; and
- optical microscopy.

Gold objects and gold areas of nose decorations are characterized by approximately the same composition, that is, Au = (79.5 ± 2.5)%, Ag = (16 ± 3)%, and Cu = (4.5 ± 1.5)%, while silver objects and silver areas of the same nose decorations show completely erratic results, and a systematic high gold concentration. Many gilded copper and tumbaga artifacts were identified and analyzed. Further, soldering gold–silver was specifically studied by radiographs.

Additional measurements are needed, particularly because of the suspect that depletion gilding was systematically employed also in the case of some nose decorations. Copyright © 2016 John Wiley & Sons, Ltd.

### Introduction

#### Historical and geographic introduction

On the north coast of present-day Peru (Fig. 1) approximately between 1200 BC and 1375 AD, various relevant civilizations flourished: Cupisnique (1200–200 BC), Chavin (1000–200 BC), Vicús and Frías (200 BC–300 AD), Moche (100–600 AD), and Sicán (700–1375 AD).

Among them, the most important, from the point of view of metallurgical ability, was the Moche civilization (also called Mochica).

The Moche civilization flourished in areas south of the Vicús, in the Moche and Chicama valleys, where its great ceremonial centers have been discovered, producing painted pottery, monuments, and gold ornaments. The Vicús and Moche cultures thrived within a relatively short distance of each other. The Moche were known as sophisticated metal smiths, both in terms of their technology, and the beauty of their jewels.

The Moche metalworking ability was impressively demonstrated when Walter Alva and coworkers discovered in 1987 the 'Tumbas Reales de Sipán'<sup>1,2</sup> and, more recently, when Regulo Franco Jordan discovered the tomb of the 'Lady of Cao' in 2005 (Fig. 2).<sup>3–6</sup> Spectacular gold and silver funerary ornaments were excavated and are now exposed in the Museum 'Tumbas Reales de Sipán' in Lambayeque, close to Chidayo and in the site Museum of Cao, about 60 km north to Trujillo.

Previously, in the late 1960, tombs rich of metals attributed to the Moche were discovered and looted in an area that came to be known as Loma Negra, in the Vicús region. Hundreds of objects attributed to Loma Negra were sold to US collectors and finally partially transferred to the Metropolitan Museum of New York.<sup>7,8</sup> The site of Loma Negra was dated about second–third century AD, possibly before the tombs of the Lady of Cao (~300 AD) and of the lord of Sipán (~350 AD). However, these dates are uncertain.

\* Correspondence to: Roberto Cesareo, Istituto di Matematica e Fisica, Università di Sassari, via Nulao 3, 07041 Alghero, Italy. E-mail: cesareo@uniss.it

a Dipartimento di Matematica e Fisica, Università di Sassari, Sassari, Italy

b PACEB Museo Cao (Fundación Wiese), Trujillo, Peru

c Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru

d COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

e Istituto per lo studio dei materiali nano-strutturati CNR-Mantelbretti, Rome, Italy

f Dipartimento di Scienze di base ed applicate per l'ingegneria, Università di Roma 'La Sapienza', Rome, Italy

2- Livro em processo de publicação:

**STUDIES ON THE SPECTACULAR GOLD AND SILVER MOCHE  
TREASURE FROM THE TOMBS “SEÑORA DE CAO” AND  
“SEÑOR DE SIPÁN”**

**ROBERTO CESAREO**

*Dipartimento di Matematica e Fisica, Università di Sassari, Sassari, Italy and  
Istituto per lo studio dei materiali nano strutturati, CNR-Montelibretti, via Salaria km.29.5, 00015 Monterotondo, Roma*

**REGULO FRANCO JORDAN, ARABEL FERNANDEZ**

*PACEB Museo Cao (Fundación Wiese), Trujillo, Peru*

**ANGEL BUSTAMANTE D., JULIO FABIAN S., SANDRA DEL PILAR ZAMBRANO**

*Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru*

**WALTER ALVA and LUIS CHERO Z.**

*Museo “Tumbas Reales de Sipán”, Lambayeque, Peru*

**CRISTIANE CALZA, SORAIA AZEREDO, MARCELINO DOS ANJOS, RICARDO T. LOPES**

*COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil*

**GABRIEL M. INGO, CRISTINA RICCUCCI, GABRIELLA DI CARLO**

*Istituto per lo studio dei materiali nano strutturati, CNR-Montelibretti, via Salaria km.29.5, 00015 Monterotondo, Roma*

**GIOVANNI E. GIGANTE**

*Dipartimento di Scienze di base ed applicate per l'ingegneria, Università di Roma “La Sapienza”*

**ANTONIO BRUNETTI**

*Dipartimento di Scienze politiche, scienza della comunicazione ed ingegneria dell'informazione, Università di  
Sassari, Sassari, Italy*



University of Sassari (Italy), October 2015

3 - Artigo a ser publicado:

### **Digital radiography technique with flat-panel detector for archaeological metallurgy analysis**

Roberto Cesareo<sup>a</sup>, Soraia Rodrigues de Azeredo<sup>b</sup>, Arabel Fernandez<sup>c</sup>, Angel Bustamante<sup>d</sup>, Julio Fabian<sup>d</sup>, Ricardo Tadeu Lopes<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Istituto di Matematica e Fisica, Università di Sassari, Sassari, Italy*

<sup>b</sup>*Nuclear Instrumentation Laboratory, PEN/COPPE/UFRJ, P.O. Box 68509, 21941-972 Rio de Janeiro, RJ, Brazil*

<sup>c</sup>*Museo Señora de Cao and Fundación Wiese, Trujillo, Peru*

<sup>d</sup>*Universidad Mayor de San Marcos, Lima, Peru*

#### **Abstract**

In the present study nose-decorations from the tomb of the lady of Cao, a Moche “queen” of a period around 300 a.C (in the Museum “Senhora de Cao” in Magdalena de Cao, from Peru) have been analysed by X-ray digital radiography (XDR) with digital detector flat-panel. The objective of these analyses was to evaluate joints between gold and silver-alloys in these nose-decorations, characterize the type of the soldering and describe the Moche technological ability. A portable XDR system was employed to radiographic imaging, consisting of a flat-panel detector APS-CMOS technology by Schick Technologies and mini X-ray tube with Au anode from Amptek. The radiographic images of the nose-decorations revealed details of the manufacturing process of the soldering between silver and gold metals.

#### **1. Introduction**

The X-ray radiography is a non-destructive testing growing in archaeological area for structural/investigative analysis of objects [1-5]. Recentemente a radiografia digital com raios X (XDR) utilizando detector flat panel vem sendo usada na área de arqueometria.