



DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INSPEÇÃO POR TÉCNICAS
RADIOGRÁFICAS NA ANÁLISE DE PERDA DE ADESÃO EM DUTOS
COMPÓSITOS

Davi Ferreira de Oliveira

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
Dezembro de 2010

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INSPEÇÃO POR TÉCNICAS
RADIOGRÁFICAS NA ANÁLISE DE PERDA DE ADESÃO EM DUTOS
COMPÓSITOS

Davi Ferreira de Oliveira

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. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Dr. Sérgio Damasceno Soares, D.Sc.

Prof. Hugo Reuters Schelin, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2010

Oliveira, Davi Ferreira de

Desenvolvimento de Sistema de Inspeção por Técnicas Radiográficas na Análise de Perda de Adesão em Dutos Compósitos/Davi Ferreira de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XII, 129 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 125-129.

1. Radiografia Computadorizada. 2. Radiografia Industrial. 3. Dutos Compósitos. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

***Este trabalho é dedicado aos meus pais
À minha esposa e ao meu filho.***

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ironival e Maria Helena, pelo carinho e incentivo, por todo o apoio e suporte que me deram durante toda a minha vida, sendo imprescindíveis para que eu chegasse até aqui.

À minha esposa Helena, minha Ursa querida, obrigado pelo carinho, pelo companheirismo e pela amizade, por estar sempre ao meu lado desde o início, me apoiando nas minhas decisões e entendendo os sacrifícios de ficarmos distantes quando tenho que viajar (pode reclamar, mas só um pouco). Obrigado por ter me ajudando a chegar até aqui. Love you Bear!!!

Ao meu filho Gabriel, por ser o excelente garoto que é, me apoiando incondicionalmente e me alegrando quando estou de mau humor, compreendendo minhas ausências apesar de algumas reclamações. Te amo Bill.

Aos demais familiares, principalmente minhas avós e meu avô, pelo carinho e incentivo durante toda a jornada.

À minha querida amiga Aline, com que tenho a felicidade de dividir o mesmo espaço durante tanto tempo. Muito obrigado pelo apoio, pela colaboração nos trabalhos e também por me perturbar todos os dias (sinto falta quando isso não acontece). Muito obrigado pelas brincadeiras e pelas conversas sérias, pelo carinho e pela confiança.

Ao grande amigo Joseilson, camarada desde que começamos a graduação, obrigado pelo incentivo e cooperação e pela amizade de todos os momentos.

Aos demais amigos que sempre estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins, sempre dispostos a ajudar não importando o que aconteça.

Aos funcionários e amigos do Laboratório de Instrumentação Nuclear: o correto seria agradecer individualmente a cada um de vocês, porém receio me esquecer de mencionar alguém. De qualquer forma, muito obrigado por toda a colaboração e apoio aos trabalhos executados, pela confiança que sempre depositaram em mim e principalmente pela amizade durante esses anos que convivo com vocês. Vocês são muito especiais para mim.

Aos demais amigos do Laboratório de Instrumentação Nuclear que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho.

Aos amigos Rômulo e Marcos Paulo do LNDC pela ajuda na realização dos ensaios deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Ricardo Tadeu Lopes, pela confiança que sempre teve no meu trabalho, por todas as oportunidades que me deu durante esses anos, pelo apoio e pela contribuição para a minha formação profissional, mas principalmente por ter se tornado um grande amigo.

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

Ao CENPES/Petrobras e à empresa Ameron International pela oportunidade de realização do projeto.

Aos amigos Heleno Simões e Edson Vasques por toda a ajuda e cooperação nos trabalhos que realizamos juntos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro.

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

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE INSPEÇÃO POR TÉCNICAS
RADIOGRÁFICAS NA ANÁLISE DE PERDA DE ADESÃO EM DUTOS
COMPÓSITOS

Davi Ferreira de Oliveira

Dezembro/2010

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho foi estudada a viabilidade do emprego da técnica de radiografia computadorizada (RC) na detecção de descontinuidades no adesivo polimérico empregado na união entre trechos de dutos com matriz de resina epóxi com reforço em fibra de vidro, desenvolvendo ainda um padrão para avaliação da sensibilidade radiográfica. Os testes foram realizados em laboratório, em corpos de prova de diferentes diâmetros, com vários tipos de descontinuidades na região do adesivo, comparando os resultados obtidos com as imagens de radiografia convencional. Após a validação, foram executadas radiografias com a técnica de RC em um circuito hidráulico para verificar a detectabilidade de descontinuidades para juntas com a presença de fluido no interior da tubulação, simulando uma condição de funcionamento. Foram realizados ainda ensaios radiográficos adicionais inserindo elementos no adesivo que atuam como agentes de contraste e utilizando a técnica de magnificação, utilizando uma fonte de raios X de microfoco. Os resultados obtidos com a técnica de RC mostraram as mesmas indicações que as imagens de radiografia convencional, com redução da exposição em até 85%. Os resultados das imagens do circuito hidráulico mostram que é possível detectar defeitos mesmo com a presença de fluidos na tubulação, sendo de grande importância para a inspeção de dutos em funcionamento.

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

DEVELOPMENT OF INSPECTION SYSTEMS USING RADIOGRAPHY
TECHNIQUES TO ANALYZE THE LOSS OF ADHESION IN COMPOSITE
PIPELINES

Davi Ferreira de Oliveira

December/2010

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

The present study aims to evaluate the feasibility of employing Computed Radiography (CR) to detect discontinuities in polymeric adhesive that is used for joining together pipeline segments made of epoxy resin and reinforced with fiber glass. A pattern to evaluate the radiographic sensitivity was also developed. Laboratory tests were performed in samples of different diameters containing several kinds of discontinuities in the adhesive area, and the results of such tests were compared with the image results obtained through conventional radiography. After the validation process, CR radiographies were performed on a hydraulic circuit in order to assess the detectability of discontinuities of certain joints containing fluid aiming to simulate real working conditions. In addition, other radiographic tests were made by inserting certain elements in the adhesive. Such elements should work as contrast agents. The magnification technique was also employed, which was achieved by a micro-focus X-Ray source. The results obtained through CR show the same indications presented in conventional radiography, with a reduction of exposure up to 85%. The images of the hydraulic circuit show that it is possible to detect defects despite the presence of fluids in the pipelines, which is significantly important in the inspection of operational pipelines.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 – PROCESSO RADIOGRÁFICO	5
2.1.1 – Formação da Imagem Radiográfica	5
2.1.2 – Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria	7
2.1.2.1 – Absorção Fotoelétrica	7
2.1.2.2 – Espalhamento Compton	9
2.1.2.3 – Produção de pares	11
2.1.3 – Equipamentos de Raios X	13
2.1.3.1 – Tubo de Vidro	14
2.1.3.2 – Catodo	14
2.1.3.3 – Anodo	16
2.1.4 – Produção de Raios X	17
2.1.4.1 – Espectro Contínuo	17
2.1.4.2 – Espectro Característico	18
2.2 – RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA	19
2.2.1 – Estrutura Física da Placa de Fósforo	20
2.2.2 – Funcionamento das Placas de Fósforo	21
2.2.3 – Eficiência de Absorção de Raios X na Placa de Fósforo	23
2.2.4 – Curva de Sensibilidade	24
2.3 – PROCESSOS DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM	25
2.3.1 – Leitor da Radiografia Computadorizada	25
2.3.1.1 – Leitura da Placa de Fósforo	27
2.3.1.2 – Detecção e Conversão do Sinal Fotoestimulado	29
2.3.1.3 - Digitalização do Sinal Fotoestimulado	32
2.3.2 – Imagem Radiográfica Digital	33
2.3.3 – Qualidade da Imagem	34
2.3.3.1 – Resolução Espacial	34
2.3.3.2 – Resolução em Contraste	36

2.3.3.2.1 – <i>Contraste do Sujeito</i>	36
2.3.3.2.2 – <i>Contraste da Imagem</i>	37
2.3.3.2.3 – <i>Fatores que Afetam o Contraste</i>	38
2.3.3.2.4 – <i>Energia do Feixe de Radiação</i>	39
2.3.3.4 – Ruídos	40
2.3.3.4.1 – <i>Ruído de Quanta nos Raios X</i>	40
2.3.3.4.2 – <i>Ruído de Luminescência</i>	40
2.3.3.4.3 – <i>Ruído da Estrutura da Placa de Fósforo</i>	41
2.3.3.4.4 – <i>Ruído de Quantização</i>	41
2.3.3.4.5 – <i>Ruído Eletrônico</i>	41
2.3.3.3 – Razão Sinal-Ruído (SNR)	42
2.4 – PROCESSAMENTO DA IMAGEM	42
2.4.1 – Restauração/Realce	44
2.4.2 – Segmentação	44
2.4.3 – Extração de Atributos	44
2.4.4 – Operações Pontuais	45
2.4.5 – Operações Locais	46
2.4.6 – Operações Globais	47
2.5 – MATERIAIS COMPÓSITOS	47
2.5.1 – Matriz Polimérica	48
2.5.2 – Sistemas de Dutos Compósitos	50
2.5.3 – Resina Epóxi	51
2.5.4 – Reforço	52
2.5.5 – Fibras de Vidro	53
2.5.6 – Fabricação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica	53
2.5.6.1 – <i>Laminação Manual (“Hand-lay-up”)</i>	54
2.5.6.2 – <i>Enrolamento Filamentar (“Filament Winding”)</i>	54
2.6 – Radiografia em Dutos Compósitos	56
2.6.1 – Juntas coladas	57
2.6.2 – Acoplamentos mecânicos	57
CAPÍTULO 3	58
MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 – CORPOS DE PROVA	58

3.2 – INDICADORES DE QUALIDADE DE IMAGEM (IQI)	63
3.2.1 – Resolução Espacial	63
3.2.2 – Sensibilidade	66
3.3 – ENSAIOS RADIOGRÁFICOS	67
3.4 – ENSAIOS COM CONTRASTE	69
3.5 – ENSAIOS COM MAGNIFICAÇÃO	70
3.6 – CIRCUITO HIDRÁULICO	71
CAPÍTULO 4	74
RESULTADOS	74
4.1 – CORPOS DE PROVA DE 16 POLEGADAS	74
4.1.1 – Determinação da Resolução Espacial	74
4.1.2 – Detecção de Defeitos	76
4.2 – CORPOS DE PROVA DE 4 POLEGADAS	91
4.2.1 – Determinação da Resolução Espacial	91
4.2.2 – Ensaios de Detecção de Defeitos	93
4.3 – TESTES COM CONTRASTE	98
4.4 – ENSAIOS COM MAGNIFICAÇÃO	101
4.5 – ENSAIOS NO CIRCUITO HIDRÁULICO	107
4.5.1 – Determinação da Resolução Espacial	107
4.5.2 – Ensaios de Detecção de Defeitos	108
CAPÍTULO 5	122
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	122
5.1 - CONCLUSÕES	122
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

LISTA DE SÍMBOLOS

BSR	Basic Spatial Resolution – Resolução Espacial Básica
GRE	Glass Reinforced Epoxi – Fibra de Vidro Reforçada com Epóxi
IP	Image Plate
IQI	Indicador de Qualidade de Imagem
PDVS	Parede Dupla Vista Simples
PMT	Photomultiplier – Fotomultiplicadora
PSL	Photoestimulable Luminescence – Luminescência Fotoestimulada
PSP	Photoestimulable Phosphor – Fósforo Fotoestimulável
PSVS	Parede Simples Vista Simples
RC	Radiografia Computadorizada
SNR	Signal to Noise Ratio – Razão Sinal Ruído
SNR _N	Normalized Signal to Noise Ratio – Razão Sinal Ruído Normalizada

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos na indústria do petróleo foi muito evidente na última década, após cerca de 35 anos de serviço satisfatório na indústria aeroespacial e de transporte. A produção *offshore* tem solicitado esse esforço para permitir a seleção de compósitos como uma alternativa econômica ao padrão em materiais metálicos.

Materiais compósitos têm se mostrado uma boa opção na seleção de materiais de engenharia devido a fatores relacionados a algumas de suas propriedades como resistência mecânica e à corrosão, baixo peso e alta durabilidade. Todavia, assim como as ligas metálicas, os materiais compósitos precisam ser inspecionados durante sua vida útil, seja na fabricação ou em serviço.

Na indústria petrolífera não é diferente, e o uso dos compósitos é cada vez mais comum, principalmente no transporte de fluidos utilizando dutos (*pipes*). Dentro deste âmbito, a PETROBRÁS utiliza dutos com matriz de resina epóxi reforçados com fibra de vidro, fabricados principalmente pela empresa AMERON com diâmetros variados transportando óleo a temperatura de 60°C.

As conexões entre os vários trechos destes dutos são feitas por juntas denominadas “ponto e bolsa” (*Quick-lock Joint – AMERON*) onde a extremidade de um dos dutos, que tem uma certa conicidade, é introduzida no duto subsequente, também apresentando conicidade, mas de diâmetro um pouco maior e são unidos por um adesivo polimérico específico para este tipo de junção e temperatura de operação.

Em juntas coladas, em geral, os defeitos com maior possibilidade de ocorrer, são as porosidades, trincas e falta de adesivo (vazios). Na interface entre o adesivo e as superfícies a serem coladas, caso existam substâncias estranhas como graxas ou óleos haverá contato, mas não haverá resistência (aderência entre as superfícies). O defeito mais freqüente em sistemas utilizando dutos em polímero reforçado com fibra de vidro se concentra na falta de adesivo, descolamento ou delaminações em juntas coladas, que

podem ser detectadas por vazamento na fase de ensaio hidrostático ou somente, quando a falta de adesivo não é completa, em operação devido às vibrações induzidas, que fazem as regiões com quantidade de adesivo abaixo do recomendado, vir a falharem. A maioria das falhas em serviço dos sistemas em materiais compósitos origina-se de erros cometidos na fase de montagem. A importância do fato mostra a necessidade de se dispor de ferramentas de avaliação que permitam, além da detecção, a formação de banco de dados para qualificação de projetos e procedimento de montagem destes sistemas.

A ocorrência de descolamentos ou perda de adesão do adesivo pode gerar perdas de pressão na linha, vazamentos de óleo ou contaminação do mesmo podendo ocasionar prejuízos na produtividade, danos ambientais e até acidentes com perdas de vidas humanas; fazendo com que o estabelecimento de métodos para inspecionar e avaliar a integridade e qualidade do adesivo seja uma necessidade urgente.

Devido ao alto custo e dificuldades de se interromper a produção para inspeções e reparos, a aplicação de métodos não destrutivos de inspeção se torna uma exigência, principalmente porque pode ser feita em campo sem a necessidade de interrupções no serviço.

Com isso, há uma grande preocupação em obter técnicas confiáveis de inspeção nestes materiais. Existe, na atualidade, uma gama de ensaios não destrutivos, muitos deles usados na indústria petrolífera; porém, poucos se destacam na caracterização de materiais compósitos e poliméricos nas configurações descritas acima. Dentre eles, pode-se citar ensaios como ultra-som (US), radiografia (RX), termografia e emissão acústica (EA).

A radiografia tem como vantagem a documentação em filmes que podem ser analisados e armazenados de maneira definitiva. Os filmes podem ser anexados aos resultados das inspeções facilitando o acesso, na necessidade de revisão ou consulta posterior da inspeção. Na radiografia é registrado um mapa de densidades do objeto inspecionado, sendo capaz de detectar pequenos defeitos, dependendo do detector utilizado.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver a técnica de radiografia computadorizada para ser utilizada como ferramenta de inspeção em juntas coladas de dutos de compósitos de resina epóxi reforçado com fibra de vidro.

Neste trabalho, desenvolveram-se técnicas de inspeção por radiografia computadorizada, correlacionando os resultados com os obtidos com radiografia convencional, técnica utilizada na atualidade na detecção de descontinuidades em juntas coladas. Foram determinados os parâmetros radiográficos mais indicados para as inspeções, como tensão, corrente e tempo de exposição, além da determinação do detector ideal para a aplicação. Para isso, foram levados em consideração os parâmetros de qualidade de imagem para radiografia computadorizada, como Resolução Espacial Básica e Razão Sinal Ruído Normalizada.

No desenvolvimento deste trabalho, propôs-se um padrão para avaliar a sensibilidade radiográfica, que até o momento não é normalizado nas inspeções em juntas coladas de materiais compósitos.

Devido a dificuldade de detectar a falta de adesivo pelas técnicas radiográficas convencionais, foram realizados ensaios com a utilização de agentes de contraste, adicionado ao adesivo. Esta técnica já foi anteriormente testada, mas poucos estudos foram conduzidos nesse sentido. Outra técnica estudada nesse trabalho, visando melhorar a detectabilidade dos defeitos, é a técnica de radiografia com magnificação, utilizando fontes de radiação de pequeno tamanho focal (da ordem de microns).

No capítulo 2 será relatado o processo de formação da imagem radiográfica, o funcionamento de equipamentos de radiografia computadorizada, processamento de imagem, além da descrição de materiais compósitos e seus componentes, sua utilização na fabricação de dutos e o uso da radiografia para a sua inspeção, ou seja, todo o embasamento teórico para a compreensão do tema do trabalho.

No capítulo 3 serão descritos os procedimentos experimentais e os equipamentos e materiais utilizados para a realização do trabalho.

Nos capítulos 4 e 5 serão apresentados, respectivamente os resultados obtidos e as conclusões acerca do tema.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 – PROCESSO RADIOGRÁFICO

A radiografia é um método usado para inspeção não destrutiva que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. Devido às diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material, diferentes regiões de uma peça absorverão quantidades diferentes da radiação penetrante. Essa absorção diferenciada da radiação poderá ser detectada através de um filme, ou através de um tubo de imagem ou mesmo medida por detectores eletrônicos de radiação. Essa variação na quantidade de radiação absorvida, detectada através de um meio, irá nos indicar, entre outras coisas, a existência de uma falha interna ou defeito no material (ANDREUCCI, 2009).

2.1.1 – Formação da Imagem Radiográfica

Quando se considera uma fonte emissora, a intensidade da radiação eletromagnética que atravessa um objeto decrescerá exponencialmente com a espessura do mesmo, de acordo com a equação 2.1.

$$I = I_0(E).exp(-\mu(E)x) \quad (2.1)$$

onde,

E é a energia da radiação incidente;

I_0 é a intensidade da fonte de radiação;

I é a intensidade da radiação após atravessar o material;

x é a espessura do material;

μ é o coeficiente total de absorção do material.

O coeficiente de absorção total é definido como a soma dos coeficientes representados pelos processos de absorção da radiação pela matéria, ou seja, efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares, μ_f , μ_c e μ_p , indicando respectivamente, a probabilidade de ocorrência dos fenômenos mencionados. Dessa forma, diferenças na densidade e variações na espessura do material, ou mesmo diferenças nas características de absorção causadas por variações na composição do material terão como consequência uma variação na intensidade do feixe transmitido, que dependerá da natureza do objeto e da energia da fonte de radiação. Dessa forma uma descontinuidade existente aparecerá no detector devido à variação entre as intensidades da radiação que passa através da parte homogênea do corpo e através da descontinuidade, como mostra a Figura 2.1 .

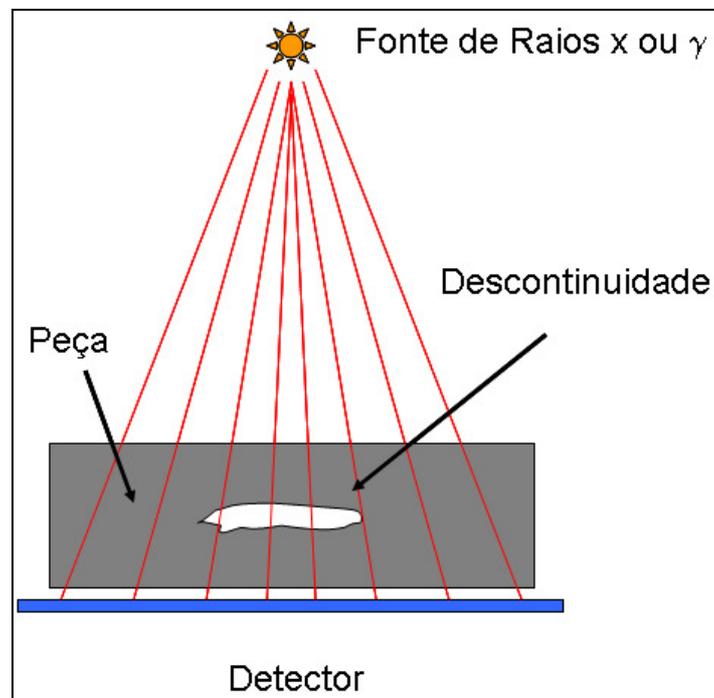


Figura 2.1 – Processo Radiográfico.

A diferença entre os coeficientes de absorção da radiação no material e na descontinuidade aumenta com o aumento entre a diferença das densidades do objeto com e sem descontinuidade, e dessa forma, a sensibilidade desse método é diretamente proporcional à densidade do objeto e inversamente proporcional à da descontinuidade. O coeficiente de absorção varia inversamente com a energia (efeito fotoelétrico e Compton), e, portanto, haverá perda de sensibilidade para fontes de energias mais altas.

2.1.2 – Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

Apesar de um grande número de possíveis mecanismos de interação da radiação eletromagnética com a matéria ser conhecidos, apenas os três tipos mais importantes serão apresentados nesta seção: absorção fotoelétrica, espalhamento Compton e produção de pares. Todos estes processos consistem na transferência parcial ou completa da energia do fóton para a energia do elétron. Estes resultam em mudanças súbitas e abruptas na trajetória do fóton, onde este pode desaparecer inteiramente ou ser espalhado em um ângulo significativo (KNOLL, 2000).

2.1.2.1 – Absorção Fotoelétrica

No processo de absorção fotoelétrica, o fóton interage com um átomo absorvedor, onde o fóton desaparece completamente. Em seu lugar, um fotoelétron energético é ejetado pelo átomo de uma de suas camadas eletrônicas. A interação acontece com o átomo como um todo e não pode ocorrer para elétrons livres. Para fótons com energia suficiente, a origem mais provável de fotoelétrons é a camada mais fortemente ligada ou camada K do átomo. O fotoelétron aparece com energia dada pela equação 2.2 (KNOLL, 2000).

$$E_c = h\nu - E_b \quad (2.2)$$

Onde E_b representa a energia de ligação do elétron em sua camada original. Para fótons com energias maiores que algumas centenas de keV, o fotoelétron carrega consigo a maioria da energia original do fóton.

A Figura 2.2 mostra a representação esquemática do efeito fotoelétrico.

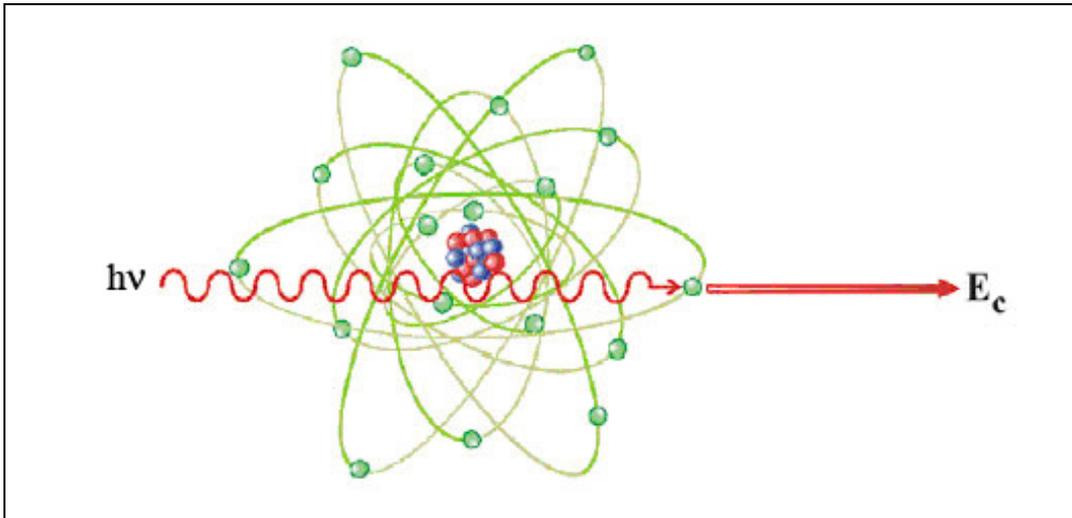


Figura 2.2 – Absorção Fotoelétrica (TAUHATA *et al.*, 2003).

Adicionalmente ao fotoelétron, a interação cria ainda um átomo absorvedor ionizado com vacância em uma de suas camadas eletrônicas. Essa vacância é rapidamente preenchida através da captura de um elétron livre do meio e/ou o rearranjo de elétrons de outras camadas do átomo. Além disso, um ou mais raios X característicos podem também ser gerados, entretanto na maioria dos casos esses fótons de raios X são reabsorvidos próximos a sua origem através de absorção fotoelétrica envolvendo camadas eletrônicas menos ligadas.

O processo de absorção fotoelétrica é o modo de interação predominante para fótons de baixa energia relativa. O processo é ainda reforçado para materiais absorvedores de alto número atômico Z . Não há uma expressão analítica válida para a probabilidade de absorção fotoelétrica por átomo para toda a faixa de energias e números atômicos, porém a aproximação grosseira é mostrada na equação 2.3 (KNOLL, 2000).

$$\tau \cong \text{constante} \times \frac{Z^n}{E^{3,5}} \quad (2.3)$$

Onde o expoente n varia entre 4 e 5 para a região de interesse de energia de fótons. Essa severa dependência da probabilidade da absorção fotoelétrica com o número atômico do absorvedor é a razão primária para a preponderância de materiais de alto Z em blindagens para fótons (KNOLL, 2000).

2.1.2.2 – Espalhamento Compton

O processo de interação de espalhamento Compton ocorre entre o fóton incidente e um elétron no material absorvedor. Este é o mecanismo de interação predominante para energias de fótons típicos de fontes de radioisótopos.

No espalhamento Compton, o fóton incidente é desviado sob um ângulo θ da direção original. O fóton transfere parte de sua energia ao elétron (assumindo que está inicialmente em repouso), que passa a ser chamado de elétron de recuo. Como todos os ângulos de espalhamento são possíveis, a energia transferida para o elétron pode variar de zero até grandes frações da energia do fóton (KNOLL, 2000).

A figura 2.3 mostra a ilustração do espalhamento Compton.

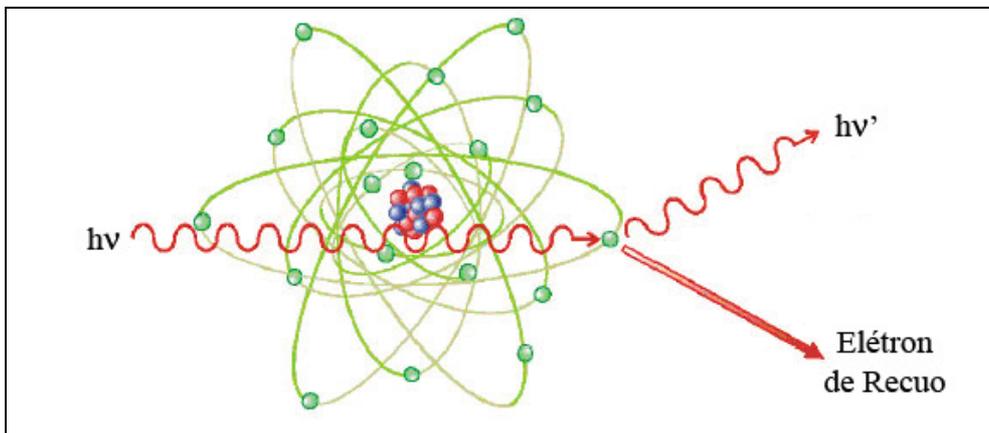


Figura 2.3 – Espalhamento Compton (TAUHATA *et al.*, 2003).

A expressão que relaciona a transferência de energia e o ângulo de espalhamento para qualquer interação pode ser simplesmente derivada escrevendo equações simultâneas para a conservação de energia e momento, como mostra a equação 2.4.

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.4)$$

Onde m_0c^2 é a energia de repouso do elétron (0,511 MeV). Para pequenos ângulos de espalhamento θ , pouca energia é transferida. Parte da energia original é sempre retida pelo fóton incidente, mesmo no extremo $\theta = \pi$.

A probabilidade de espalhamento Compton por átomo do absorvedor depende do número de elétrons disponíveis como alvos de espalhamento e assim aumenta linearmente com Z .

A distribuição angular do fóton espalhado é predita pela fórmula de Klein-Nishina para seção de choque diferencial de espalhamento $d\sigma/d\Omega$, como mostra a equação 2.5 (KNOLL, 2000).

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad (2.5)$$

Onde $\alpha \equiv hv/m_0c^2$ e r_0 é o raio clássico do elétron. A distribuição é mostrada graficamente na figura 2.4 e ilustra a forte tendência do espalhamento para frente para altos valores de energia do fóton.

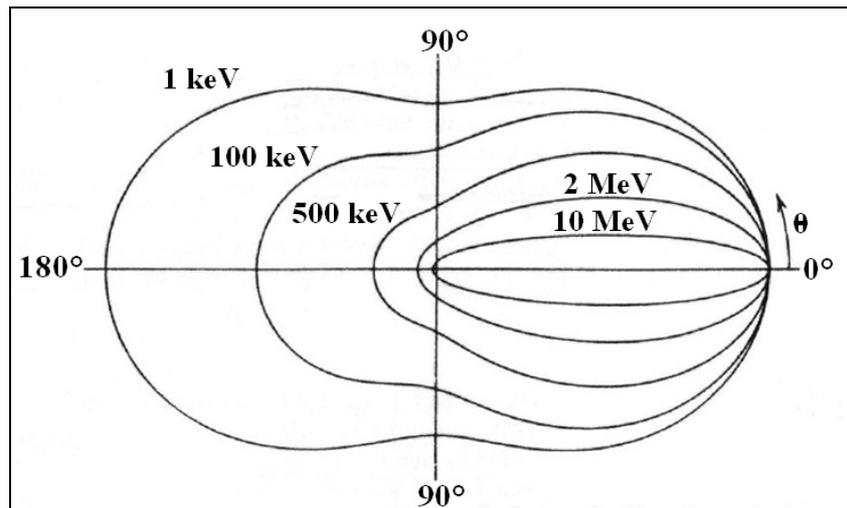


Figura 2.4 – Seção de choque diferencial de espalhamento Compton (KNOLL, 2000)

2.1.2.3 – Produção de pares

Se a energia do fóton excede o dobro da energia de repouso do elétron (1,02 MeV), o processo de produção de pares é energeticamente possível. A probabilidade dessa interação permanece muito baixa até a energia do fóton se aproximar de vários MeV e assim a produção de pares está predominantemente confinada a fótons de altas energias. Na interação (que acontece no campo coulombiano do núcleo), o fóton desaparece e é substituído por um par elétron-pósitron. A figura 2.5 ilustra esse processo (KNOLL, 2000).

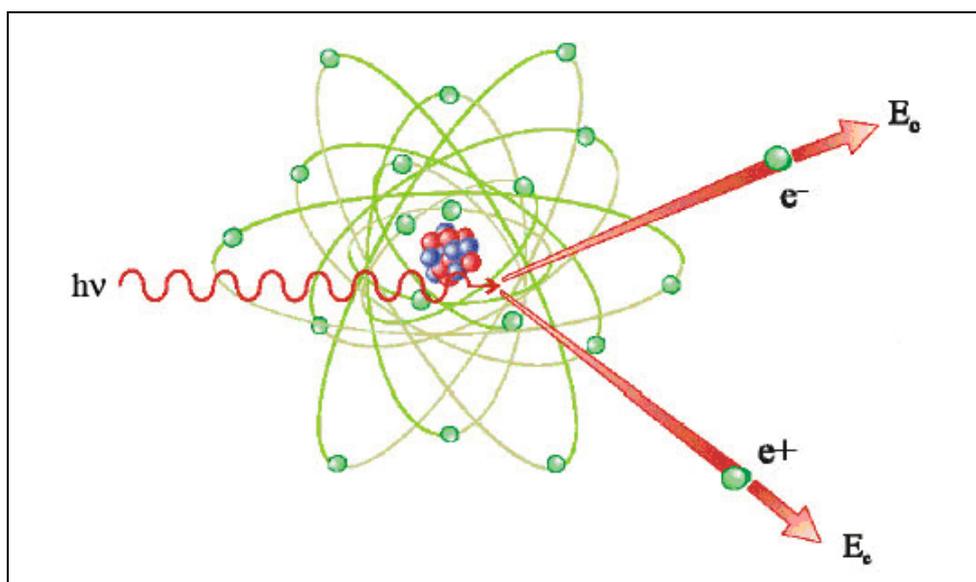


Figura 2.5 – Produção de Pares (TAUHATA *et al.*, 2003).

Todo o excesso de energia contida no fóton acima dos 1,02 MeV necessários para criar o par se transforma em energia cinética compartilhada pelo elétron e pelo pósitron. Como o pósitron irá subsequentemente se aniquilar após entrar em um meio absorvedor, dois fótons de aniquilação são normalmente produzidos como produtos secundários da interação.

Não existe uma simples expressão para a probabilidade de produção de pares por núcleo, porém sua magnitude varia aproximadamente com o quadrado do número atômico do absorvedor.

A importância relativa dos três processos descritos anteriormente para diferentes materiais absorvedores e energias do fóton são ilustradas na figura 2.6. A linha a esquerda representa a energia que a absorção fotoelétrica e o espalhamento Compton são igualmente prováveis em função do número atômico do absorvedor. A linha a direita representa a energia que o espalhamento Compton e a produção de pares são igualmente prováveis. Assim três áreas são definidas no gráfico onde a absorção fotoelétrica, o espalhamento Compton e a produção de pares predominam em cada (KNOLL, 2000).

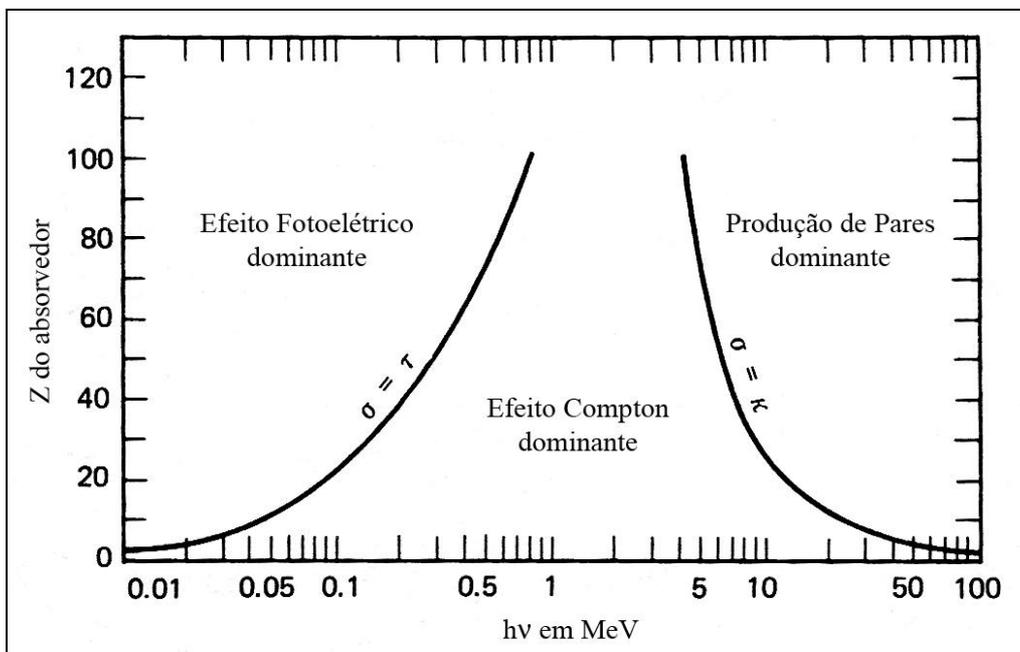


Figura 2.6 – Importância relativa dos três principais processos de interação (KNOLL, 2000).

2.1.3 – Equipamentos de Raios X

Os equipamentos de raios X são aparelhos que emitem radiação X quando energizados, segundo uma tensão e uma corrente estabelecida pelo usuário. Os aparelhos de raios X são classificados de acordo com a sua potência e com as aplicações para as quais são projetados. Para fins industriais, podem-se encontrar equipamentos que emitem raios X com energias variando entre 10 a 800 keV. Nesta sessão, serão apresentadas as principais características dos equipamentos de raios X, assim como seus principais componentes, que podem ser vistos na Figura 2.7.

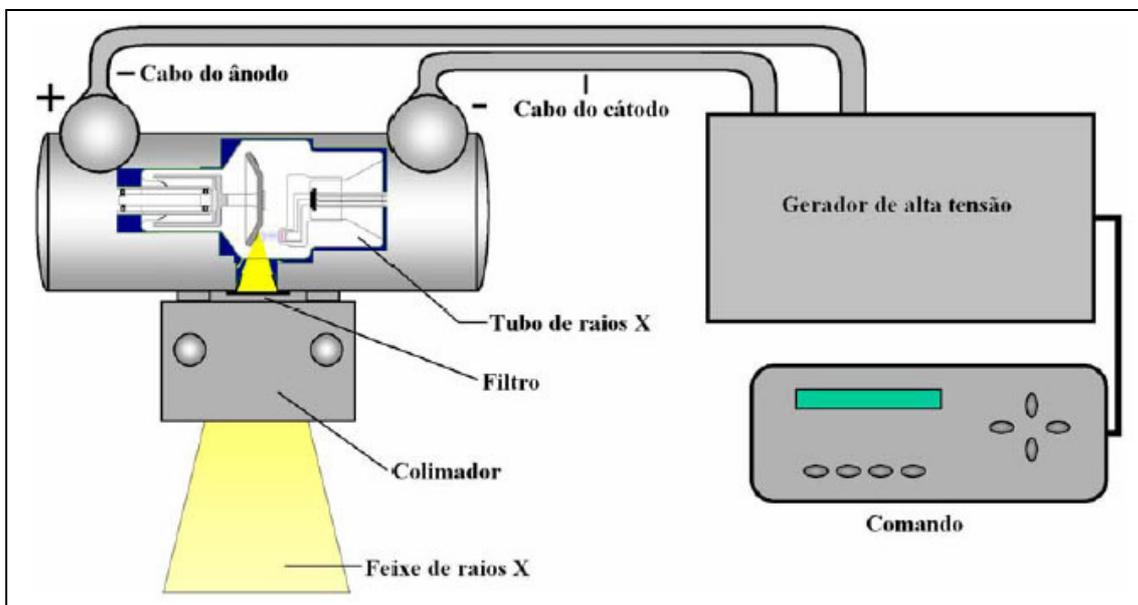


Figura 2.7 – Esquema de um equipamento de raios X.

Os raios X são gerados dentro de uma ampola especial de vidro. O tubo fica inserido dentro de um cabeçote, envolto num óleo especial. Este óleo serve como isolante eletrostático e como dissipador de calor da ampola. O cabeçote possui um revestimento de chumbo para blindar a radiação que não contribui diretamente na formação da imagem. No cabeçote há uma janela que permite a passagem do feixe de raios X. O tubo de raios X é basicamente composto por uma carcaça de vidro, o anodo e catodo (filamento). Na Figura 2.8 pode-se ver a ilustração de um tubo de raios X e seus principais componentes.

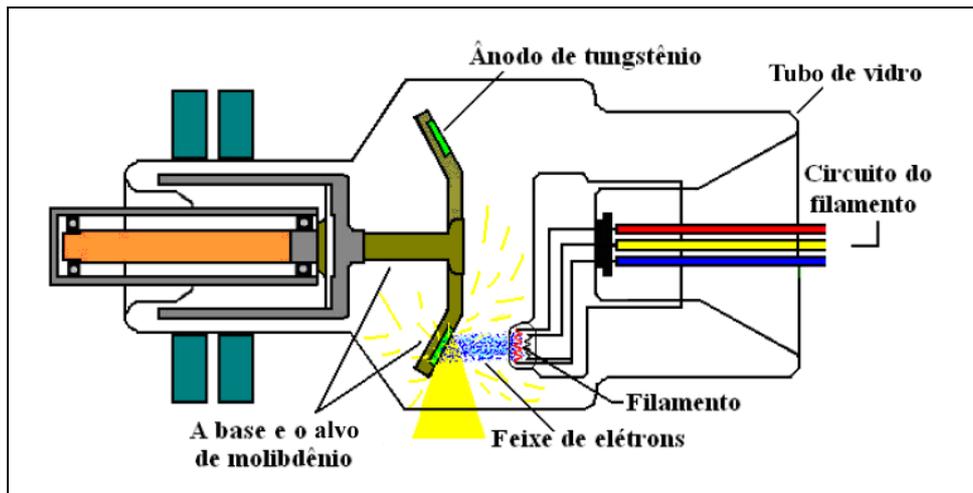


Figura 2.8 – Ampola de raios X (ANDREUCCI, 2003).

2.1.3.1 – Tubo de Vidro

O tubo de vidro é a parte exterior do tubo de raios X, constituída de um vidro especial, o qual deve atender a uma série de requisitos, conforme a seguir:

- a) possuir boa resistência mecânica;
- b) possuir boa resistência a variação da temperatura;
- c) possuir boa vedação, para manter o alto vácuo;
- d) possuir bom isolamento de alta tensão;
- e) ter transparência à radiação X;
- f) ser quimicamente estável, de modo que a passagem da radiação X não modifique suas características;
- g) possibilitar solda com metais das conexões (catodo e ânodo).

O vidro que atende a estas características é do tipo PYREX. Sua composição é de 67 % de SiO₂ e 23 % de B₂O₃. Este tipo de vidro permite a solda com o molibdênio e com uma liga de ferro, níquel e cobalto.

2.1.3.2 – Catodo

O catodo é o pólo negativo do tubo de raios X, sendo composto pelo filamento e pela capa focalizadora.

O filamento possui uma forma de espiral, geralmente de tungstênio, com 2 mm de diâmetro e com 1 cm a 2 cm de comprimento. Este é aquecido pela passagem de corrente elétrica de 3 a 6 A e a temperatura pode atingir a 2000°C. A alta temperatura do filamento proporciona o surgimento do efeito termiônico. O tungstênio é empregado geralmente devido à sua alta eficiência termiônica e ao seu alto ponto de fusão. Após a emissão termiônica, os elétrons permanecem na proximidade do filamento, criando uma carga espacial nesta região. Aplicando-se uma diferença de potencial entre o cátodo e ânodo, ocorre o deslocamento dos elétrons que se encontram na carga espacial, em direção ao ânodo, criando um feixe de elétrons (corrente anódica). Este feixe tende a se dispersar devido à repulsão eletrostática entre os elétrons. Para evitar a dispersão, é adicionada uma capa focalizadora junto ao filamento. Esta é projetada num determinado formato, que quando carregada negativamente possibilita colimar o feixe de elétrons, por meio da força de repulsão. A eficiência da capa focalizadora depende do seu tamanho, da sua forma e da carga aplicada, além de depender da dimensão, da forma e do posicionamento do filamento no interior da própria capa focalizadora. Na Figura 2.9 podemos observar o filamento e a influência da capa focalizadora na colimação do feixe de elétrons.

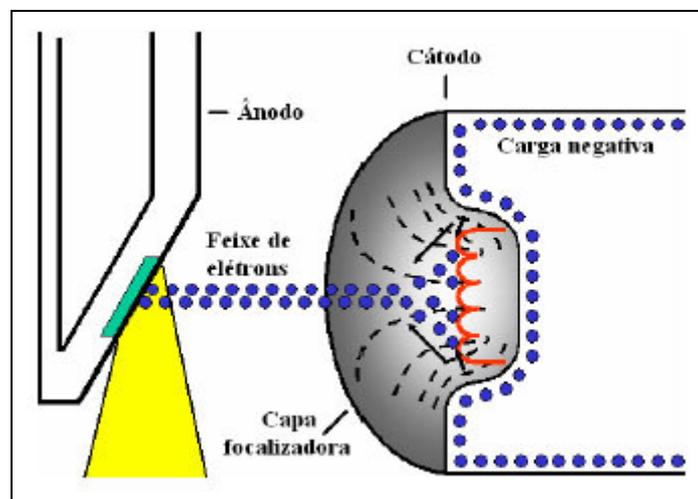


Figura 2.9 – Ilustração do cátodo e da capa focalizadora.

2.1.3.3 – Anodo

O anodo é o terminal positivo do tubo de raios X, podendo ser fixo ou rotatório. Este serve de suporte para o alvo. É feito de cobre para permitir a rápida dissipação de calor, pois quando os elétrons se chocam com o alvo, cerca de 99% de suas energias cinéticas são convertidas em calor.

O anodo fixo é utilizado em equipamentos de baixa potência, como os odontológicos e alguns transportáveis. Para os equipamentos de raios X que trabalham com média e alta potência é utilizado o anodo rotatório.

O anodo rotatório é formado por um disco que gira durante a exposição. O alvo se encontra na parte mais externa deste disco, formando uma trilha que possibilita dissipar o calor produzido numa maior área. Originalmente, o alvo era confeccionado de tungstênio. Atualmente, para aumentar a resistência da superfície contra a formação de pequenas fendas e buracos, é confeccionado com uma liga, geralmente composta de 90% de tungstênio e 10% de rênio. A escolha do tungstênio deve-se as seguintes razões:

- a) possui um alto número atômico, que implica em grande eficiência na produção de raios X e com maior energia;
- b) sua condutividade térmica é quase igual a do cobre, resultando em uma rápida dissipação do calor produzido;
- c) possui alto ponto de fusão (3370°C), enquanto que a temperatura durante o bombardeamento de elétrons gira em torno de 2000°C.

Na Figura 2.10 apresenta a ilustração dos dois tipos de anodos citados acima.

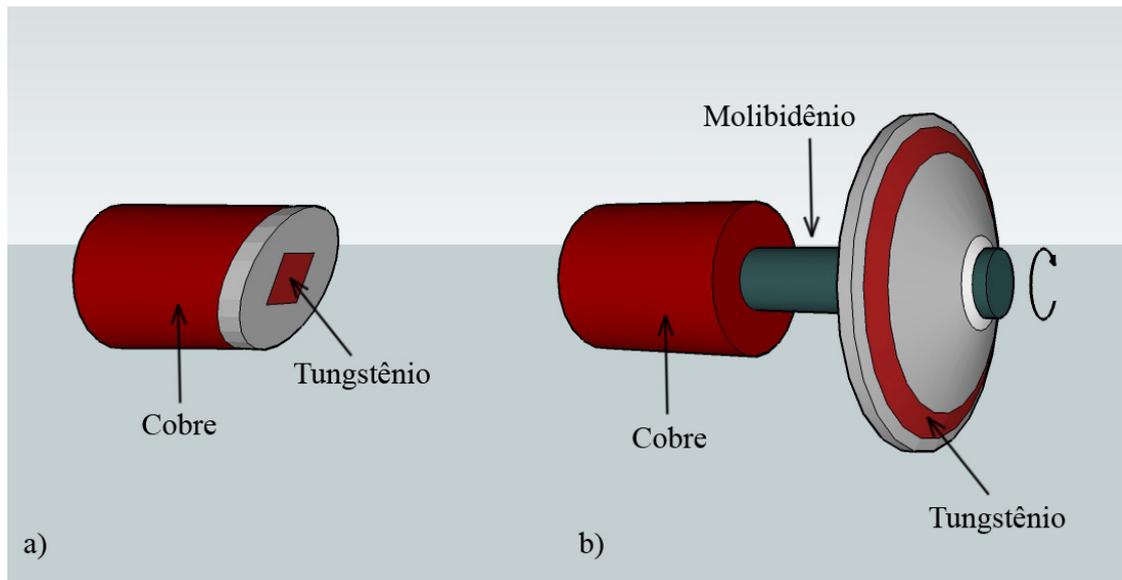


Figura 2.10 – a) anodo fixo e b) anodo rotatório.

2.1.4 – Produção de Raios X

Quando a ampola de raios X é colocada em funcionamento, cria-se em torno do filamento uma nuvem eletrônica, que é acelerada em direção ao anodo quando aplicada uma diferença de potencial. Quando esses elétrons são desacelerados repentinamente por meio de interação com os átomos do alvo, há uma transformação da energia cinética que foi ganha durante a aceleração em radiação eletromagnética (raios X). Dependendo do tipo de interação dos elétrons gerados com o alvo, os raios X podem ser produzidos de duas formas: frenamento e colisão.

2.1.4.1 – Espectro Contínuo

Neste processo, os elétrons são defletidos pela carga elétrica positiva localizada no núcleo dos átomos do alvo, devido a interação coulombiana. Sabe-se que uma partícula carregada livre emite radiação eletromagnética quando tem sua trajetória alterada. Este fenômeno é conhecido como “bremsstrahlung” ou radiação de freinamento. Aplicando o princípio de conservação de energia, tem-se:

$$h\nu = k - k' \quad (2.6)$$

onde

k é a energia cinética do elétron antes da interação;

k' é a energia cinética do elétron após a interação e

$h\nu$ é a energia do fóton emitido.

Logo, é possível observar que quanto maior a deflexão sofrida pelo elétron, maior será a energia do fóton de raios X emitido. Assim, os comprimentos de onda dos fótons emitidos podem variar de um máximo ($k \approx k'$) e um mínimo ($k' = 0$), originando um espectro de radiação contínua, como pode ser visto na Figura 2.11.

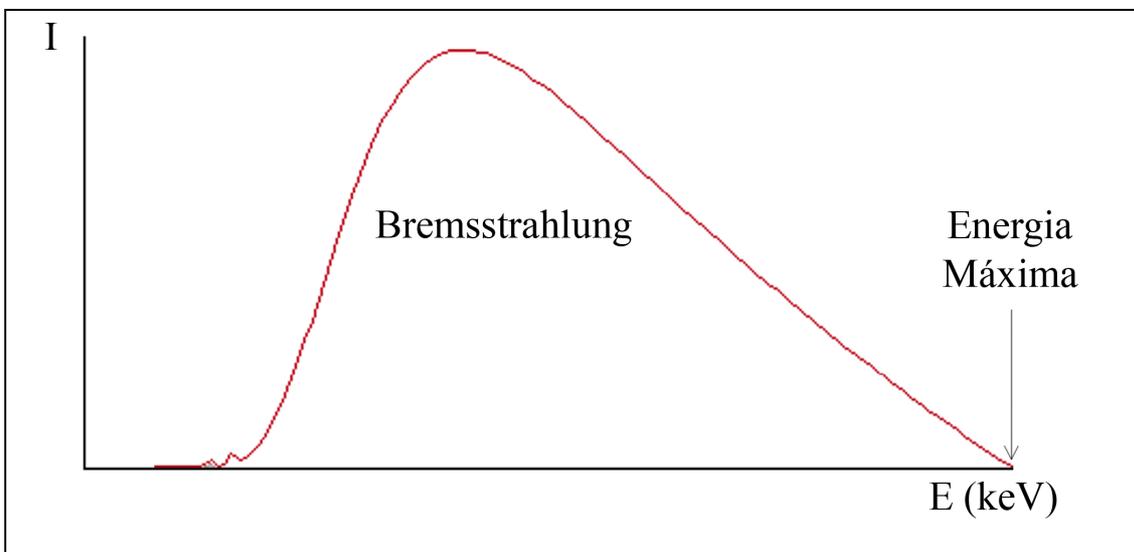


Figura 2.11 – Espectro de radiação contínua.

2.1.4.2 – Espectro Característico

Este processo ocorre quando um elétron energético interage com o átomo do alvo e arranca um de seus elétrons mais internos (por exemplo: do nível K). Conseqüentemente, este nível fica com uma vacância. Então, um dos elétrons mais externos se move para preencher essa vaga, emitindo nessa transição um fóton de raios X. Esse fóton é conhecido como raios X característicos e são geralmente devido às transições orbitais entre as camadas K, L e M. Quando o elétron que preenche o buraco vem do nível energético L, temos a linha K_{α} . Quando vem do nível M, temos a linha K_{β} .

O espectro final da radiação é o conjunto da radiação contínua (bremsstrahlung) e de raios X característicos, como pode ser visto na Figura 2.12.

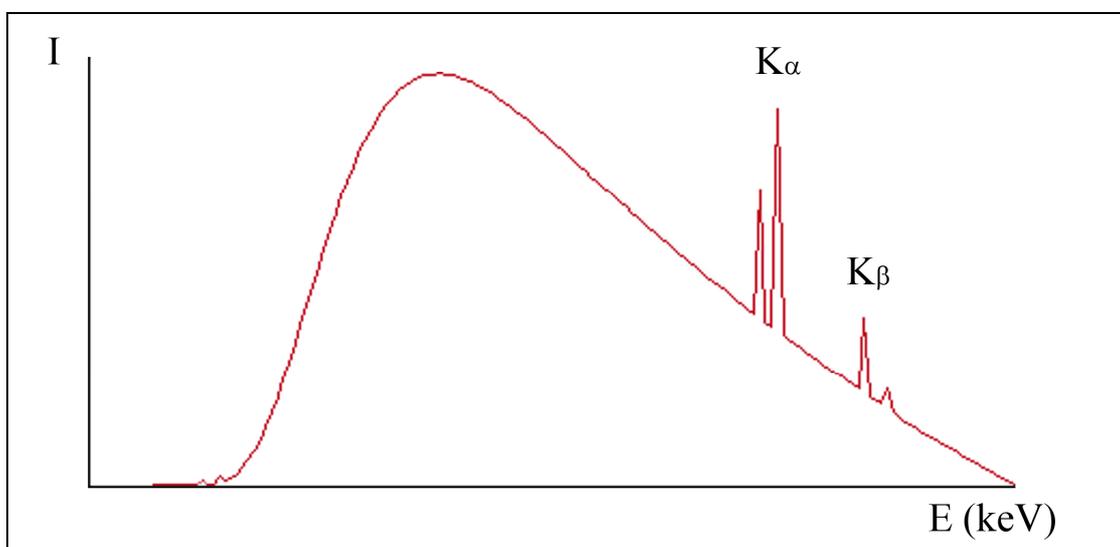


Figura 2.12 – Espectro de radiação contínua com os picos característicos.

2.2 – RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A radiografia computadorizada (RC) utiliza no processo radiográfico placas de fósforo fotoestimuláveis, que são também conhecidos como fósforos de armazenagem (SONODA *et al*, 1983). Estes são os mais bem sucedidos comercialmente detectores para radiografia digital. Os fósforos usados com maior frequência são da família do fluoreto de bário (BARNES, 1993) em forma de pó e depositados em um substrato para formar a placa de fósforo. Os mecanismos de absorção de raios X são idênticos aos de telas de fósforos convencionais usados com filmes. A diferença é que o sinal óptico útil não é derivado da luz emitida imediatamente a incidência de radiação, mas de uma subsequente emissão, quando a imagem latente consistindo em cargas aprisionadas é estimulada opticamente e liberadas das armadilhas metaestáveis. Isso desencadeia um processo chamado luminescência fotoestimulada (PSL) resultando na emissão de luz de comprimento de onda curto (azul) em quantidade proporcional ao fluxo de raios X original. Em radiografia computadorizada, a placa de fósforo é posicionada em um cassete, para a proteção contra a luz e exposto aos raios X e em seguida é escaneada com um laser para liberar a luminescência fotoestimulada. A luz azul de PSL é coletada e detectada por um tubo fotomultiplicador. O sinal da fotomultiplicadora é digitalizado

ponto a ponto para formar a imagem (FUJITA *et al*, 1989).

2.2.1 – Estrutura Física da Placa de Fósforo

A estrutura da placa de fósforo consiste em um suporte de poliéster, camada de fósforo, camada protetora e outros componentes que podem variar de acordo com o fabricante. Na Figura 2.13, pode se ver a disposição física das camadas da placa de fósforo.

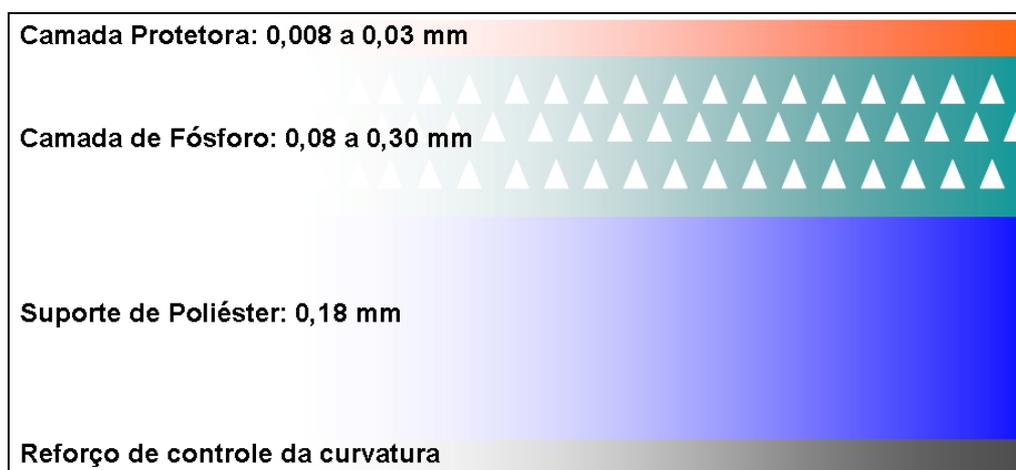


Figura 2.13 – Composição das camadas da placa de fósforo.

A camada de fósforo é protegida por uma camada protetora EBC (*Electronic – Beam – Cured*), que é composta por um pré-polímero de alta densidade com aproximadamente 10 μm de espessura, garantindo assim maior proteção contra agentes mecânicos e químicos, que poderiam danificar a placa de fósforo durante o processo de leitura ou manipulação pelos usuários.

A camada do fósforo fotoestimulável é comumente constituída de cristais de BaFBr:Eu^{2+} , com grãos de tamanho variados, dependendo do tipo de placa. Essa camada além de conter os grãos de fósforo tem em sua composição um polímero orgânico de modo a unir os grãos e providenciar uma formação uniforme do filme.

A camada de suporte, composta de polietileno (PET – *Polyethylene Terephthalate*) possui espessura entre 200 e 350 μm e, além da função de proteção da camada do fósforo contra agentes externos, serve também para manter uma

planificação do filme e apresentar flexibilidade. O suporte pode ter lamina pretas na sua parte posterior de modo a providenciar assim absorção de luz que entrariam de forma indesejada.

Além das características mencionadas acima, todas as camadas devem manter suas propriedades físicas inalteradas por temperatura, umidade, raios X, luz do laser, além de apresentar flexibilidade e resistência mecânica.

2.2.2 – Funcionamento das Placas de Fósforo

Apesar de muitos elementos apresentarem como característica a emissão de luminescência fotoestimulada (PSL), a maioria dos fósforos utilizados na radiografia computadorizada fazem parte de uma classe de haletos de alcalinos terrosos dopados com európio, entre os quais se destaca o flúor brometo de bário dopado com európio bivalente (BaFBr:Eu^{2+}). Este elemento possui uma resposta de luminescência fotoestimulada altamente linear quando exposto a energia dos raios X. Além disso, possui uma resposta muito rápida com um tempo de vida muito curto, possibilitando a sua utilização em sistema de escaneamento de alta velocidade. Possivelmente, são usados outros tipos de fósforos, como o flúor bromo iodeto de bário (BaFBr/I:Eu^{2+}), mas nenhum com tanta frequência como o BaFBr:Eu^{+2} .

Pode ser dito que o fósforo utilizado em radiografia computadorizada deve ter no mínimo dois centros de armazenagem de energia proveniente de radiação, um para os elétrons que são liberados quando interagem com os fótons de raios X e outro que são os centros de armazenamento de buracos, chamados de ativadores, que no caso dos fósforos de haleto de bário flúor são os íons de európio (Eu^{2+}). Além disso, os ativadores devem ser capazes de capturar os elétrons liberados no processo de excitação ótica (segundo estímulo).

Sabe-se que nos cristais de haletos, os F centros são criados quando irradiados com raios X. Nos cristais de BaFBr:Eu^{+2} dois tipos de F centros são obtidos: um devido ao flúor e outro devido ao bromo. Ambos os centros são criados pelo mesmo processo, contudo, somente os formados com bromo contribuem significativamente para o

processo de fotoestimulação.

Na Figura 2.14 pode ser visto o espectro típico de fotoestímulo. A linha vermelha corresponde ao F centro baseado no bromo. A linha preta contínua é o espectro total e a linha azul é a diferença entre elas. Assim é visto que o fotoestímulo é devido basicamente aos F centros do bromo (F – (Br⁻)).

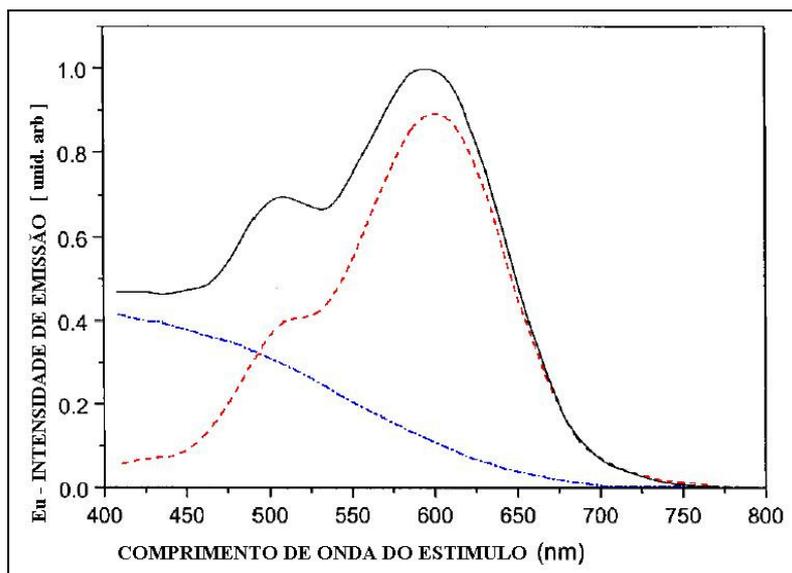


Figura 2.14 – Espectro de fotoestímulo do BaFBr:Eu²⁺ (SEGGERN, 1999).

Quando o fósforo é exposto à radiação ionizante, pares elétron-buraco são criados na rede cristalina. A quantidade de pares é proporcional à energia de radiação absorvida. Estes podem se recombinar imediatamente a partir do estado excitado do íon Eu²⁺ ou criar estados quase estáveis (F centros). Os F centros e seus correspondentes buracos armazenam a energia absorvida da radiação ionizante e quando irradiado pelo laser, com comprimento de onda adequado, no processo de leitura da placa de fósforo, os F centros absorvem fótons do laser, elevando os elétrons a um estado excitado. A partir desse estado este pode receber energia térmica atingindo a banda de condução. Uma vez na banda de condução, o elétron está disponível para recombinar com os buracos capturados pelos íons Eu²⁺ e emitir luz correspondente a essa transição (TAKAHASHI, 1985).

2.2.3 – Eficiência de Absorção de Raios X na Placa de Fósforo

A eficiência de absorção dos fótons de raios X pode influenciar no ruído de quanta (*X-ray Quanta Noise*). Neste tópico será analisado a curva de eficiência de absorção do fósforo fotoestimável em função da energia dos fótons raios X.

Na Figura 2.15, pode ser visto o gráfico que mostra a variação da absorção em função da energia dos fótons incidentes, para dois tipos de fósforo diferentes e a variação da absorção dos fótons em função da densidade superficial para o BaFBr com densidades diferentes (SEIBERT, 1999).

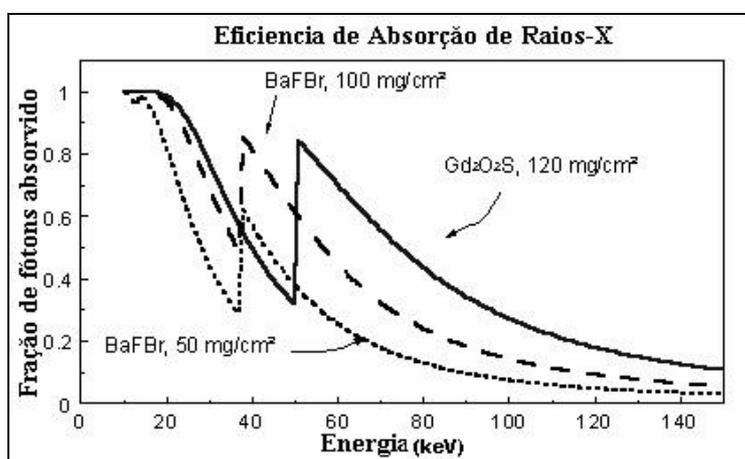


Figura 2.15 – Gráfico de absorção em função da energia do raios X (SEIBERT, 1999).

Observa-se que os fósforos representados no gráfico, apresentam uma alta eficiência de absorção para fótons de baixas energias, aproximadamente 10 keV, indicando que uma imagem radiográfica pode perder qualidade (presença de ruído) devido à radiação ionizante ambiental. Após um período de tempo sem usar a placa de fósforo, é aconselhado que este seja “apagado” antes do próximo uso, eliminando assim a influência dessas radiações. Outro aspecto importante com relação à eficiência para fótons de energias baixas é o uso de filtros no momento de uma exposição, eliminando o efeito de espalhamento de radiação.

Observa-se também, que o fósforo de BaFBr:Eu apresenta uma eficiência melhor comparada com o Gd₂O₂S:Tb (écran de terra rara), que foi uma das condições impostas durante a pesquisa do fósforo ideal (encontrar um fósforo

fotoestimulável com eficiência igual ou superior aos écrans existentes). Segundo a curva de eficiência apresentada acima, o fósforo usado na placa de fósforo apresenta um pico próximo a 40 keV, esse pico é devido à linha k do bário (37 keV).

Outro aspecto importante é com relação à densidade superficial (μ/ρ , onde: μ representa o coeficiente de absorção do material e ρ a densidade do material). É observado que para o mesmo fósforo, porém com densidades diferentes, existe uma variação na eficiência de absorção. O fósforo que tem uma densidade superficial maior (100 mg/cm^2) apresenta uma eficiência maior do que o fósforo com uma densidade superficial menor (50 mg/cm^2). Dessa forma, é visto que a eficiência do fósforo pode ser aumentada com o aumento da densidade superficial (espessura do filme). Porém, como foi mencionado anteriormente, o aumento da camada do fósforo resulta na diminuição da resolução. Novas tecnologias têm estudado técnicas de aumentar a densidade superficial sem aumentar a espessura do filme (SEIBERT, 1999).

2.2.4 – Curva de Sensibilidade

A Figura 2.16 mostra a curva de resposta para um receptor típico de fósforo fotoestimulável comparado com um filme de ISO 400 usando um écran de terra rara. Pode-se observar as principais características das placas de fósforo, como a linearidade entre a dose e a intensidade de luminescência, a ampla resposta à variação de exposição e a alta sensibilidade à radiação.

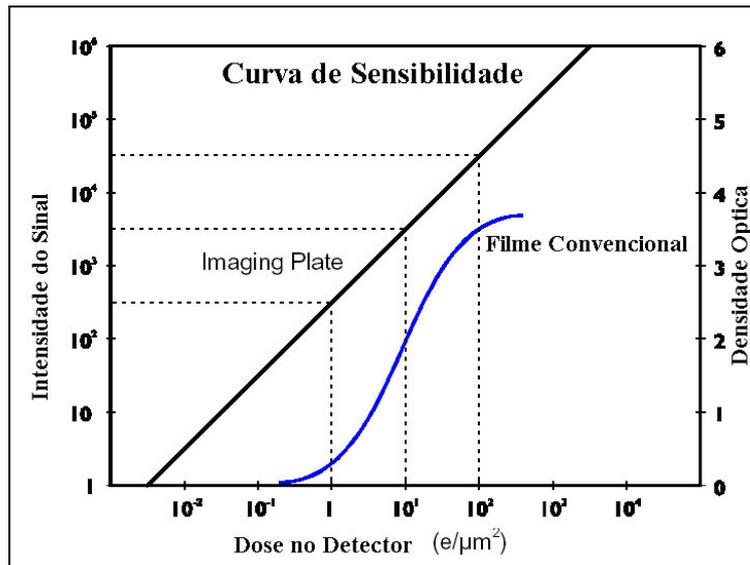


Figura 2.16 – Comparação da curva de sensibilidade entre o filme convencional e a placa de fósforo.

Para sistemas filme-écran, que servem tanto como meio de aquisição de imagem como também para a visualização, é necessário sintonizar o contraste do filme com a velocidade radiográfica (ISO) a faixa de exposição, para adquirir uma imagem com contraste ótimo e o mínimo de ruído. Já com placa de fósforo isso não é necessário, devido ao fato da aquisição e a visualização da imagem serem eventos que ocorrem separadamente. Então, compensações para sub e sobre exposição são possíveis por meio de algoritmos aplicados aos dados digitais.

Devido a alta sensibilidade das placas de fósforo, aproximadamente 100 vezes mais sensível do que os filmes radiográficos convencionais, elimina-se o longo tempo de exposição, sendo capaz de detectar radiação onde filmes radiográficos convencionais não seriam.

2.3 – PROCESSOS DE AQUISIÇÃO DA IMAGEM

2.3.1 – Leitor da Radiografia Computadorizada

O leitor da radiografia computadorizada (RC) é um dispositivo eletromecânico que incorpora todas as funções necessárias para a extração da imagem latente e reconstrução/exibição da radiografia final. Em termos de recursos e design, existe certa

variação de fabricante para fabricante, mas todos os leitores realizam as seguintes funções básicas: um sistema de alimentação aceita a placa de fósforo, numa velocidade uniforme, um sistema de transporte conduz a placa de imagem através de um escâner com feixe de laser estimulador; a luminescência fotoestimulada, ponto por ponto, é coletada por um filtro que faz a separação da fotoestimulação contra o espectro da luminescência, uma vez que o feixe de estimulação é várias ordens de grandeza mais intenso que a luminescência (dados da imagem). Em seguida, um fotomultiplicador/detector amplifica o sinal. O sinal analógico é convertido em digital e o computador armazena a matriz em um *buffer* de imagem para as operações subsequentes, como exibição, inserção de anotações, análise, medição, armazenamento etc. Muitas vezes, depois da estação de leitura, há ainda a etapa do apagamento, realizada pela ação de uma luz fluorescente brilhante (OLIVEIRA, 2004). A Figura 2.17 mostra um diagrama funcional de um sistema típico.

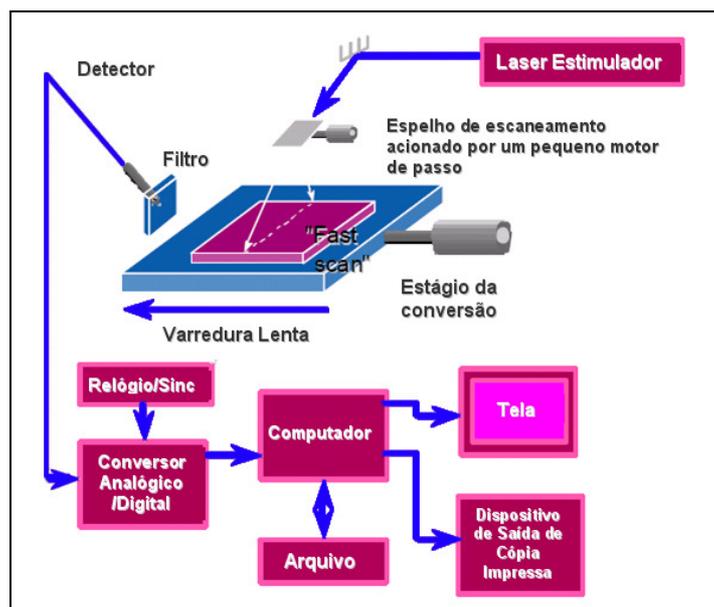


Figura 2.17 – Sistema da imagem de fósforo de armazenamento (MAZUR, 2006).

Essas funções eletromecânicas são comuns à maioria dos leitores da RC. O que realmente as diferencia é o programa especializado para recursos personalizados e funcionalidade. Dentro do espaço de trabalho digital, o potencial do computador permitirá o aprimoramento da imagem com tarefas como a correção do efeito de magnificação geométrica, inerente à técnica de exposição tangencial e a realização de trabalho simples de estimativas de espessura de parede.

2.3.1.1 – Leitura da Placa de Fósforo

No processo de luminescência fotoestimulável necessita-se de um segundo estímulo. Como os centros de cor absorvem energia quando irradiados com raio laser vermelho, para ler a imagem utiliza-se tipicamente um feixe direcionado de raios laser de He-Ne. A absorção de energia pelos centros de cor libera elétrons presos com conseqüente emissão de luz azul (390 nm) quando esses elétrons liberados se recombinam com as lacunas nos lugares ocupados pelo Eu^{2+} , voltando então às suas posições de valência originais. A intensidade dessa emissão é proporcional à carga presa, que por sua vez é proporcional à absorção original dos raios X.

A velocidade com a qual a varredura é feita com o laser sobre a placa é ajustada de acordo com o tempo de decaimento do sinal luminescente (0,8 μs para o fósforo BaFBr:Eu²⁺), que é um dos principais fatores limitantes para o tempo de leitura da placa de fósforo.

A potência do feixe do laser determina que fração de energia armazenada será liberada, gerando impactos no tempo de varredura, no efeito de atraso fosforescente e nos sinais residuais. Lasers com potências altas podem liberar mais elétrons aprisionados, mas em troca há uma perda na resolução espacial, causada pelo aumento da penetração do feixe do laser aumentando o espalhamento da luz estimulada na camada do fósforo. Em alguns sistemas atuais, já é possível regular a intensidade do laser de estímulo. Para garantir que somente os fótons de luminescência sejam coletados pelo sistema, é utilizado um filtro ótico especial, destinado a bloquear a luz estimuladora, que tem uma intensidade muito maior que a luz emitida pela placa de fósforo.

A leitura da placa de fósforo é realizada linha a linha, e no final de cada linha o feixe retorna ao início da próxima linha. Como a placa do fósforo está se movendo simultaneamente, a velocidade de translação é ajustada de modo que a próxima varredura do feixe do laser inicie com um espaçamento igual à área efetiva do foco do laser sobre a placa, garantindo que dimensões de amostra são iguais na direção x e y.

A terminologia utilizada para se referir à direção ao longo do caminho da reflexão do laser é a direção de escaneamento. A direção de sub-escaneamento é referida à direção de movimento da placa (SEIBERT, 1999). Na Figura 2.18 pode ser visto a disposição da varredura do laser sobre a placa de fósforo.

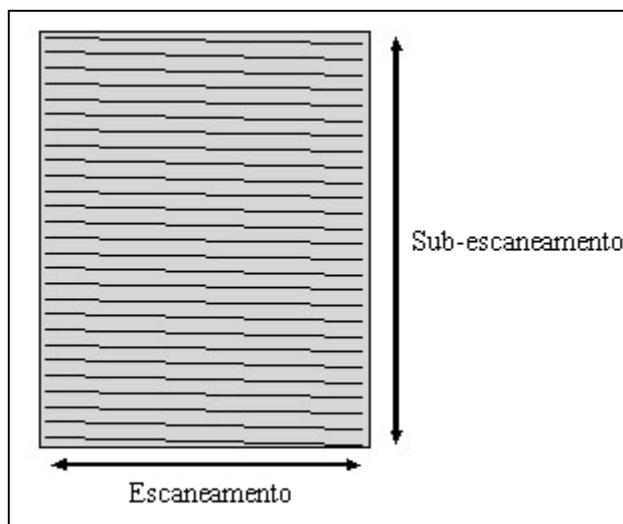


Figura 2.18 – Disposição de varredura do laser (SEIBERT, 1999).

Durante a leitura, nem toda a energia armazenada na tela é liberada. Para garantir a remoção completa de toda imagem latente, a placa de fósforo de armazenamento é apagada com uma luz branca de alta intensidade, que a ilumina por um curto período, permitindo assim que ela seja reutilizada em outras exposições. A etapa do apagamento pode ser realizada no leitor RC (desde que este possua um sistema de apagamento acoplado) ou em um equipamento a parte, imediatamente em seguida à etapa de leitura (SEIBERT, 1999). Na Figura 2.19 pode ser visto o ciclo da placa de fósforo.

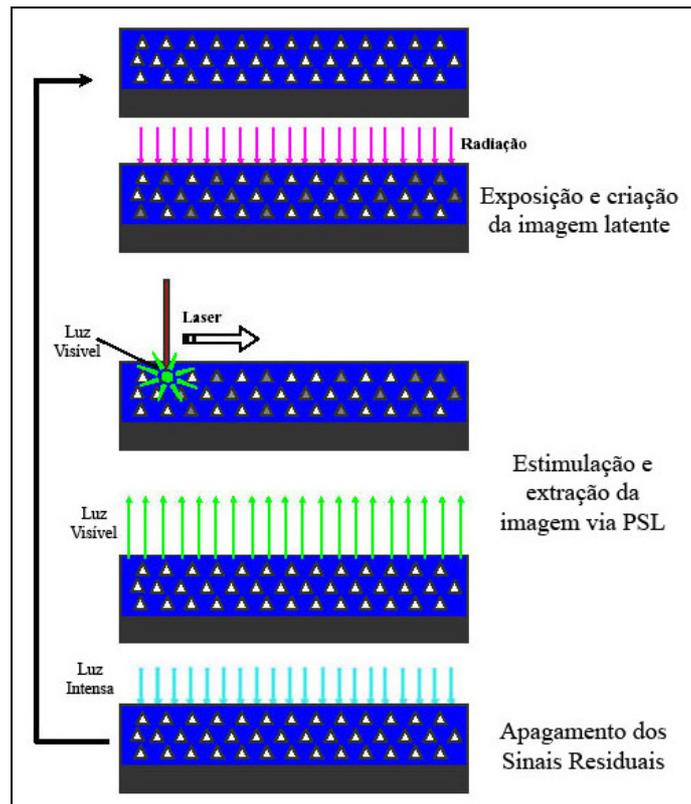


Figura 2.19 – Representação esquemática do processo de formação da imagem computadorizada (SEIBERT, 1999).

2.3.1.2 – Detecção e Conversão do Sinal Fotoestimulado

O sinal fotoestimulado é emitido em todas as direções a partir do fósforo. Em alguns equipamentos, um sistema de captura óptica (guia coletor de luz) é posicionado na interface fósforo-laser ao longo de toda direção de varredura, de modo a capturar uma porção da luz emitida e a direcionar ao catodo de um tubo fotomultiplicador (PMT). Na Figura 2.20 pode ser visto a foto de um guia coletor de luz.

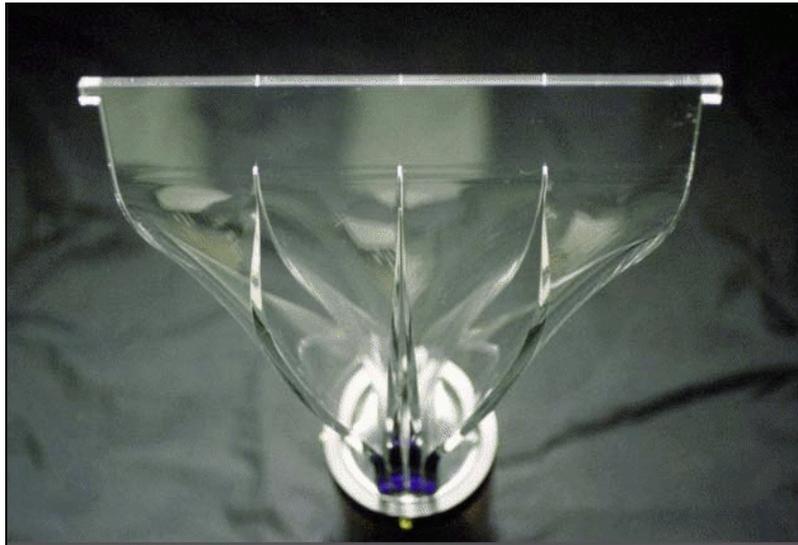


Figura 2.20 – Guia coletor de luz (OLIVEIRA, 2004).

Em outros equipamentos, a luz emitida pela placa de fósforo é refletida por espelhos parabólicos e direcionada ao tubo fotomultiplicador, como mostra a Figura 2.21.

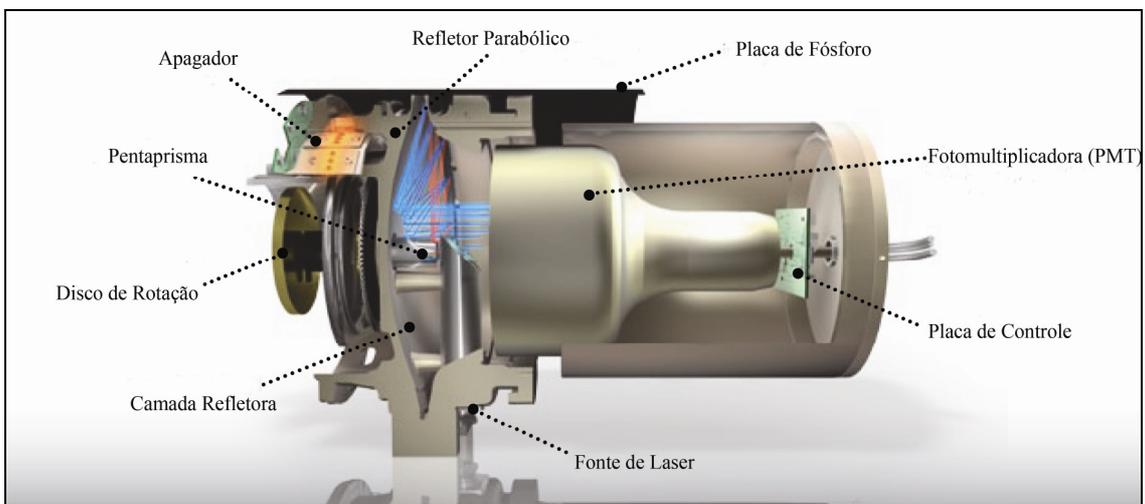


Figura 2.21 – Esquema de leitura de uma placa de fósforo em um equipamento com espelhos parabólicos (DURR NDT).

A fotomultiplicadora tem como função básica coletar a luz produzida na luminescência e transformá-la em pulsos de corrente elétrica. Seus componentes básicos são apresentados na Figura 2.22.

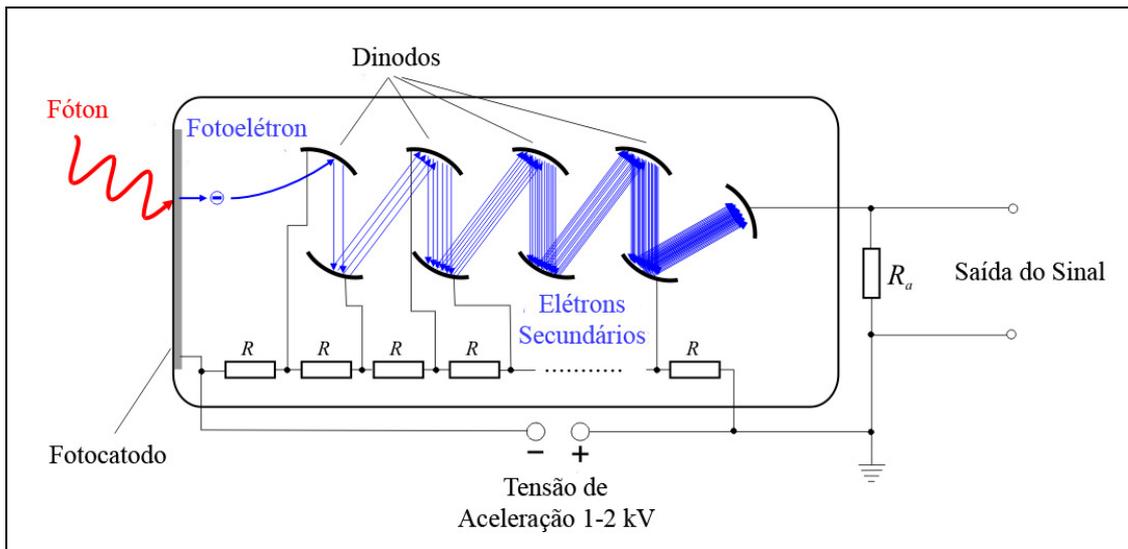


Figura 2.22 – Elementos básicos de uma fotomultiplicadora (BENUTZER, 2007).

A sensibilidade da janela do fotocátodo do tubo fotomultiplicador é ajustada de modo que somente o comprimento de onda correspondente a luz emitida ($400 \mu\text{m}$) seja capturado, descartando assim a possibilidade de absorção de fótons de outros comprimentos de onda.

Fóton-elétrons emitidos pelo cátodo são acelerados e amplificados através de uma série de dinodos dentro do tubo fotomultiplicador. O ganho é dado pelos ajustes de acordo com a voltagem sobre os dinodos. Assim, um sinal de corrente útil é obtido na saída do tubo.

A faixa dinâmica do sinal de saída de um tubo fotomultiplicador é muito maior do que em uma placa de fósforo, permitindo assim, uma boa amplificação do sinal de saída.

A variação da intensidade de luz corresponde à variação na exposição, ou seja, quanto maior a exposição da placa de fósforo maior será o número de fótons emitidos no processo de luminescência.

Finalmente, os elétrons são coletados no ânodo produzindo um pulso de corrente que pode ser medido por um circuito eletrônico apropriado (OLIVEIRA, 2004).

2.3.1.3 - Digitalização do Sinal Fotoestimulado

O processo de digitalização é feito em dois passos: amostragem e quantização. Na amostragem é determinada a localização e o tamanho do sinal fotoestimulado de uma área específica do receptor. Na quantificação é determinado o valor médio da amplitude do sinal na área.

A saída do tubo fotomultiplicador é medida em uma frequência temporal, coordenada com a taxa de varredura do laser, sendo quantizado a um valor inteiro e discreto dependente da amplitude do sinal e o número total de valores digitais possíveis.

Um conversor analógico – digital (A/D) converte o sinal de saída do tubo fotomultiplicador a uma taxa muito mais rápida que a taxa de varredura do laser. Um dispositivo “*pixel clock*” coordena o tempo em que um sinal foi codificado com a posição física na linha de varredura. Dessa forma, é possível estabelecer uma relação entre o sinal e a posição em que ele foi gerado.

A razão entre a taxa de amostragem no conversor A/D e a varredura ao longo do caminho da reflexão do laser determina o tamanho do *pixel* na direção de escaneamento. A velocidade de translação, sub-escaneamento, é coordenada com tamanho do *pixel* na direção de escaneamento. Dessa maneira, o espaçamento entre as linhas é igual à largura do *pixel*, obtendo assim *pixel* quadrado. Atualmente, o tamanho típico do *pixel* fica em torno de 50 μm , podendo alcançar menores valores dependendo do sistema de radiografia computadorizada.

Embora exista uma infinita possibilidade de valores de voltagens analógicos, entre o máximo e o mínimo na saída do tubo fotomultiplicador, o conversor A/D quebra o sinal em uma série de valores discretos, para codificar a amplitude do sinal. O número de bits utilizados para se aproximar do sinal analógico determina o número de valores discretos possíveis. Em geral, os sistemas utilizam 12 ou 16 bits, tendo dessa forma, 4096 ou 65536 valores possíveis para uma dada amplitude do sinal analógico, respectivamente (OLIVEIRA, 2004).

2.3.2 – Imagem Radiográfica Digital

As imagens obtidas no processo de luminescência fotoestimulada são matrizes que podem ser manipuladas de modo a apresentarem imagens alternativas. Juntamente com os sistemas de radiografia computadorizada, os fabricantes providenciam junto aos seus equipamentos sofisticados computadores e programas, de modo que o usuário final possa manipular a imagem de acordo com suas necessidades.

A imagem digital é armazenada através de dígitos binários denominados bits, que podem assumir os valores 0 ou 1. A um conjunto de bits chamamos byte.

Os bits e bytes são usados para representar os *pixels* da imagem digital. Diferentes configurações de bytes representam as diversas tonalidades de grau de cinza nos *pixels*. A Figura 2.23 mostra o relacionamento entre as configurações de *bytes*, valores de *pixel* e tonalidades de cinza.

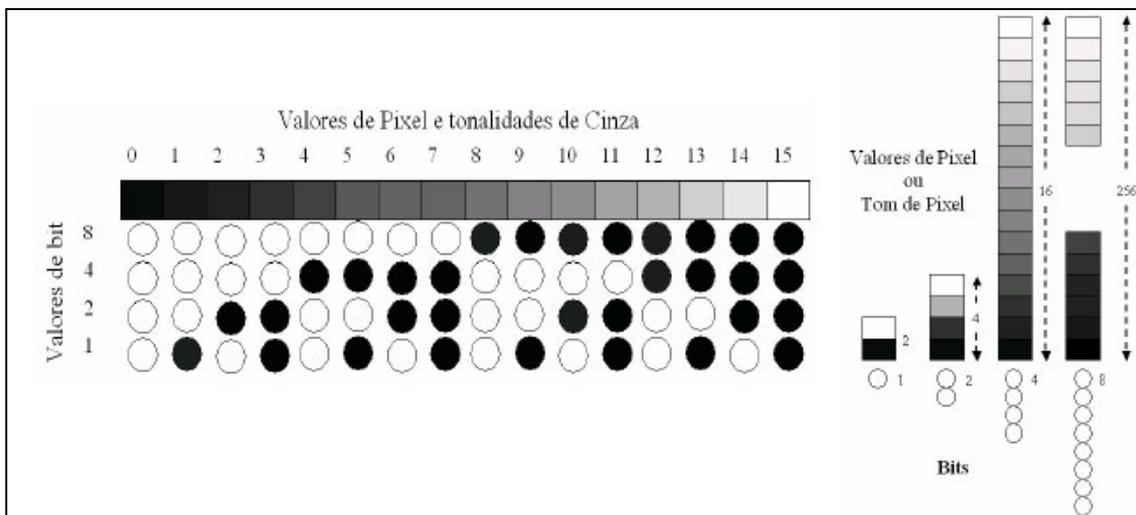


Figura 2.23 – Comportamento entre os valores de *pixel* e os tons de cinza (CORREA, 2009).

O tamanho numérico de uma imagem (número de bytes) determina o espaço no disco ou computador utilizado para guardá-la. A maior parte dos sistemas de aquisição de imagens digitais trabalha com bytes de oito bits.

2.3.3 – Qualidade da Imagem

Neste tópico serão apresentados alguns dos fatores que influenciam na qualidade de uma imagem radiográfica, como resolução espacial, contraste e ruído.

2.3.3.1 – Resolução Espacial

Um dos principais parâmetros que afetam a qualidade da imagem digital é a resolução espacial. A resolução espacial é definida como sendo a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser distinguidos ou visualizados.

A resolução espacial de uma imagem radiográfica está atrelada a uma série de fatores, que contribuem para uma degradação do sinal, causando uma perda de definição na imagem (desfocagem geométrica), como a seguir:

- a) limitações físicas impostas pela composição do material;
- b) espessura da placa de fósforo;
- c) o tamanho finito do diâmetro do foco do laser incidente na camada do fósforo;
- d) atraso temporal da luminescência;
- e) espalhamento da luminescência no fósforo.

O atraso na luminescência causa uma resolução espacial ligeiramente menor na direção ao longo do caminho da reflexão do laser (direção de escaneamento) do que na direção de movimento da placa (sub-escaneamento), embora fosse esperada uma maior precisão no movimento ótico/eletrônico do que no movimento mecânico. A varredura é ajustada para um tempo de decaimento da luminescência de 0,8 μ s. Caso esse decaimento ocorra depois desse tempo, o posicionamento do laser estará em nova posição, logo o sinal atrasado não será interpretado como proveniente do ponto anterior.

A perda de resolução devido à placa de fósforo ocorre devido a três processos:

- a) a difusão do feixe de luz estimulante na placa de fósforo;
- b) estimulação dos fósforos pela luz de luminescência emitida por outros grãos;

c) reflexão da luz do feixe estimulante na camada de suporte da placa de fósforo.

A Figura 2.24 esquematiza alguns exemplos de processos de degradação da resolução espacial.

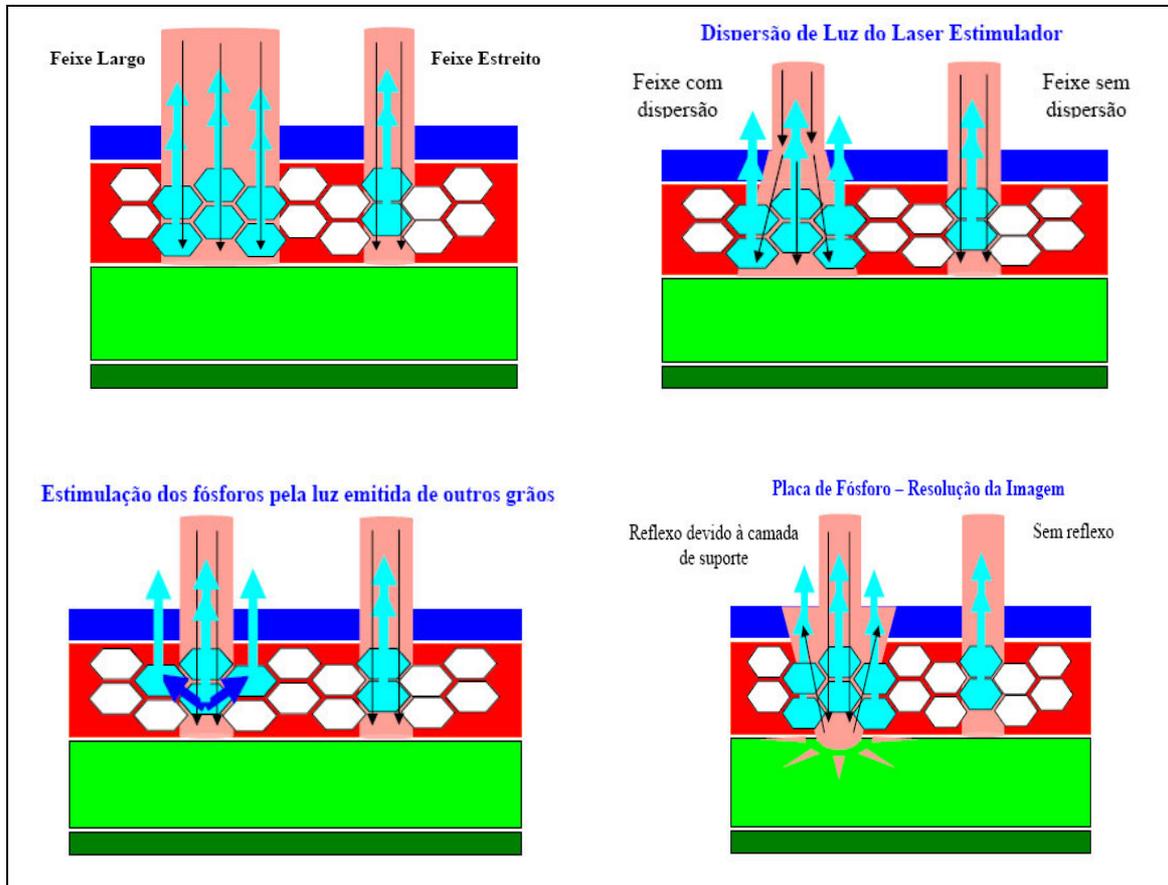


Figura 2.24 – Processos de degradação da resolução espacial (OLIVEIRA, 2007).

A perda de resolução devido à placa de fósforo pode ser reduzida de diversas maneiras:

- a) a camada de fósforo pode ser colorida de forma a otimizar a absorção do feixe de estimulação e minimizar a absorção da luz de luminescência;
- b) os grãos de fósforo devem possuir pequena dimensão para minimizar a dispersão;
- c) a camada protetora e de fósforo deve ter espessura reduzida;
- d) a camada de suporte deve incorporar um corante absorvente para evitar a formação de reflexos sobre a camada de fósforo.

2.3.3.2 – Resolução em Contraste

A menor diferença em um sinal que pode ser representado entre *pixels* digitais na imagem depende do número total de códigos (nível de quantificação), assim como a amplitude do sinal em relação ao background.

O contraste é função da espessura e da diferença de densidade ou composição química (número atômico) do objeto, e pode ser dividido em dois tipos: contraste do sujeito e contraste da imagem.

2.3.3.2.1 – Contraste do Sujeito

Após a interação da radiação com diferentes estruturas do corpo de prova, emerge destas uma radiação cuja distribuição em energia é diferente daquela que o penetrou, devido ao fato de no trajeto, haver estruturas de características diferenciadas. A essa nova distribuição de energias que compõem o feixe dá-se o nome de imagem área, e a diferença na exposição entre vários pontos dentro da imagem área denomina-se contraste do sujeito. Este é afetado principalmente pela energia da radiação incidente no corpo de prova.

Pode-se exemplificar o contraste do sujeito comparando as intensidades de radiação emergente de estruturas como o alumínio e o plástico. Se as duas intensidades tiverem uma relação de magnitude entre si de quatro vezes, pode-se dizer que o contraste do sujeito terá valor quatro. Na Figura 2.25 é mostrado um gráfico onde se pode observar diferentes intensidades de um feixe de raios X que emerge de estruturas distintas, no caso alumínio e plástico (SPRAWLS, 1995).

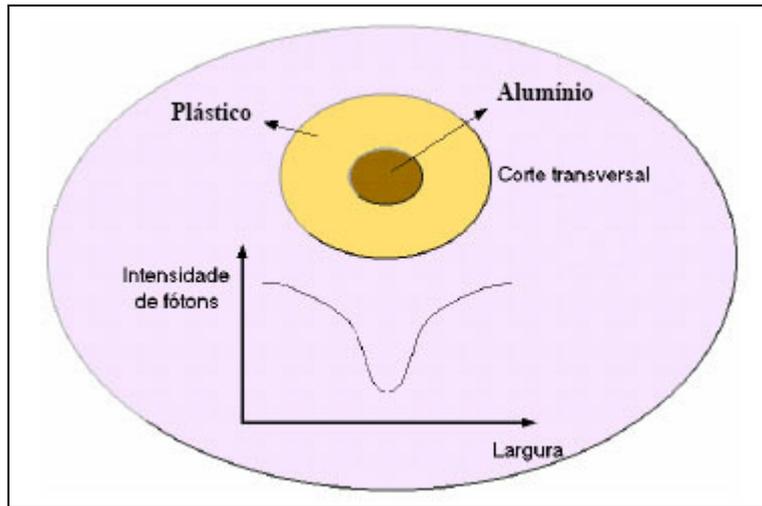


Figura 2.25 – Intensidade relativa do feixe de raios X após atravessar o corpo de prova.

2.3.3.2.2 – Contraste da Imagem

Contraste da imagem é o grau de diferenciação em tons de cinza de duas estruturas adjacentes na imagem. O contraste da imagem depende basicamente das características das estruturas do corpo inspecionado, composição dos materiais, densidade e espessura, da energia e da intensidade de fótons que emergem das diferentes estruturas (contraste do sujeito) e das características do sistema de detecção de imagem (SPRAWLS, 1995). Na Figura 2.26 são mostrados os estágios de formação do contraste da imagem.

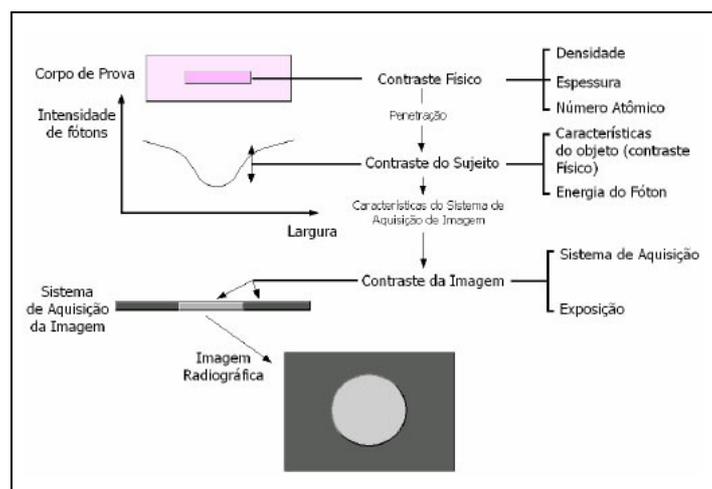


Figura 2.26 – Estágios de formação do contraste da imagem (SPRAWLS, 1995).

2.3.3.2.3 – Fatores que Afetam o Contraste

Entre os fatores que afetam o contraste de uma imagem radiográfica, pode-se citar dois: radiação espalhada e energia do feixe de radiação.

A radiação espalhada diminui o contraste, “mascarando” detalhes na imagem. A Figura 2.27 mostra uma ilustração do contraste de uma imagem obtida sem e com a radiação espalhada.

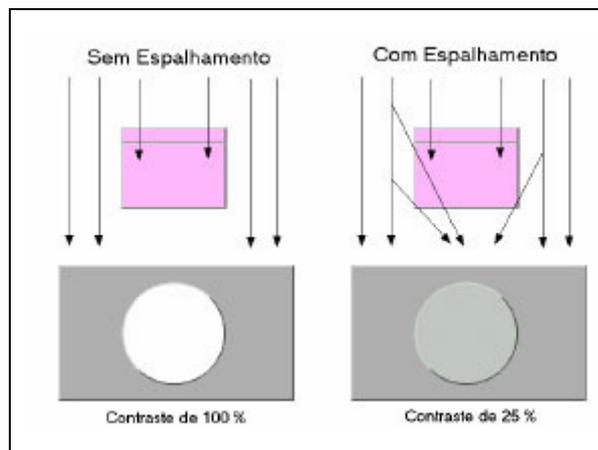


Figura 2.27 – Contraste obtido sem e com radiação espalhada (SPRAWLS, 1995).

O contraste diminui exponencialmente com o aumento da radiação espalhada. Na Figura 2.28 é apresentado o comportamento do contraste da imagem com o aumento da radiação espalhada.

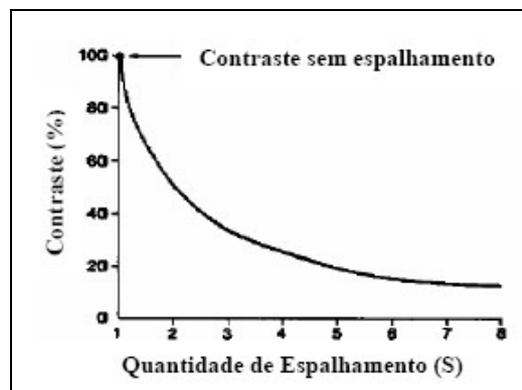


Figura 2.28 – Comportamento do contraste da imagem em função da radiação espalhada (SPRAWLS, 1995).

A radiação espalhada deve-se à interação da radiação com objetos nos arredores da região de inspeção. Após atingir estes objetos, uma parte da radiação pode ser espalhada e interagir com o detector, gerando informação que pode prejudicar a informação da região de interesse. Em radiografia industrial, esse fenômeno é bastante comum nas inspeções de campo, devido principalmente a energia da radiação utilizada nos ensaios.

A radiação espalhada pode ser prevenida com a utilização de telas de chumbo nas partes anterior e posterior do detector, de forma a atenuar a radiação de mais baixa energia proveniente das interações de espalhamento.

2.3.3.2.4 – Energia do Feixe de Radiação

A energia é um dos fatores que mais influenciam o contraste radiográfico, controlando a capacidade de penetração do feixe de radiação. Quanto maior a energia, menor será a diferença entre a intensidade de fótons provenientes das várias densidades de massa do corpo de prova, produzindo menor variação na atenuação. A Figura 2.29 mostra a variação do contraste em função do aumento da energia do feixe (SPRAWLS, 1995).

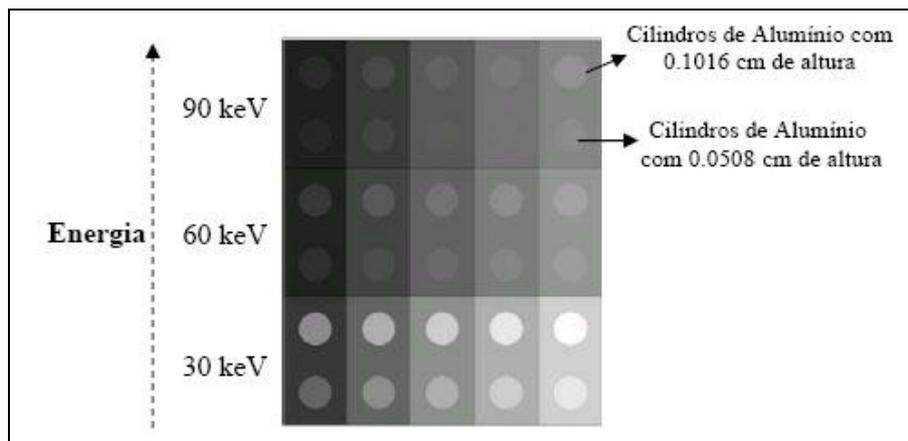


Figura 2.29 – Escala de degraus de tecido adiposo com cilindros de alumínio inseridos (CORREA, 2009).

Assim como o filme convencional tem contraste limitado a uma dada velocidade de exposição radiográfica, o contraste na imagem radiográfica digital é limitado pelo nível de ruído.

2.3.3.4 – Ruídos

O ruído é a variação aleatória de intensidade no sinal da imagem, que contribuem para redução de visualização de detalhes, especialmente de objetos pequenos e de baixo contraste. O ruído da imagem possui diversas origens. A própria maneira aleatória que os fótons de radiação são distribuídos no processo de formação da imagem é uma fonte de ruído, denominado ruído quântico.

Existem vários tipos de fontes de ruídos que podem contribuir para o ruído geral na imagem final, contudo serão mencionados apenas os mais importantes.

2.3.3.4.1 – Ruído de Quanta nos Raios X

A variação randômica dos raios X, ao ser absorvida pelo receptor PSP, determina o componente de ruído quântico. Mesmo quando exposto a um feixe de raios X uniforme, o número de quanta absorvido por unidade de área na placa de fósforo varia, conforme a distribuição de Poisson. Quanto menor o número de fótons absorvidos, maior será o grau de flutuação.

2.3.3.4.2 – Ruído de Luminescência

A variação da luminescência estimulada durante o processo de leitura contribui significativamente para a variação na saída do sinal. Essa flutuação é causada pelo número de fótons gerados no fósforo. O ruído de luminescência é inversamente proporcional ao número de fótons e depende também de vários outros fatores tais como, a energia dos raios X incidente, a quantidade de luminescência fotoestimulada na placa de fósforo, a eficiência do guia coletor de luz, a estabilidade do laser e a eficiência do conversor fotomultiplicador.

2.3.3.4.3 – Ruído da Estrutura da Placa de Fósforo

Esse tipo de ruído é causado pela irregularidade da camada interna do fósforo fotoestimulável. Para uma diminuição desse ruído é importante que a granulação do fósforo seja a menor possível e que tenha uma distribuição uniforme.

2.3.3.4.4 – Ruído de Quantização

Ruído de quantização adiciona incerteza na determinação dos sinais digitais discretos. Este tipo de ruído é dependente da quantidade de bits utilizado no processo de conversão analógica – digital.

2.3.3.4.5 – Ruído Eletrônico

Ruído eletrônico causa degradação no sinal de saída, durante todo o processo, contudo com maior intensidade no processo de conversão fotoelétrico. Na Figura 2.30 pode-se observar a contribuição dos ruídos durante todo o processo de obtenção de uma imagem radiográfica.

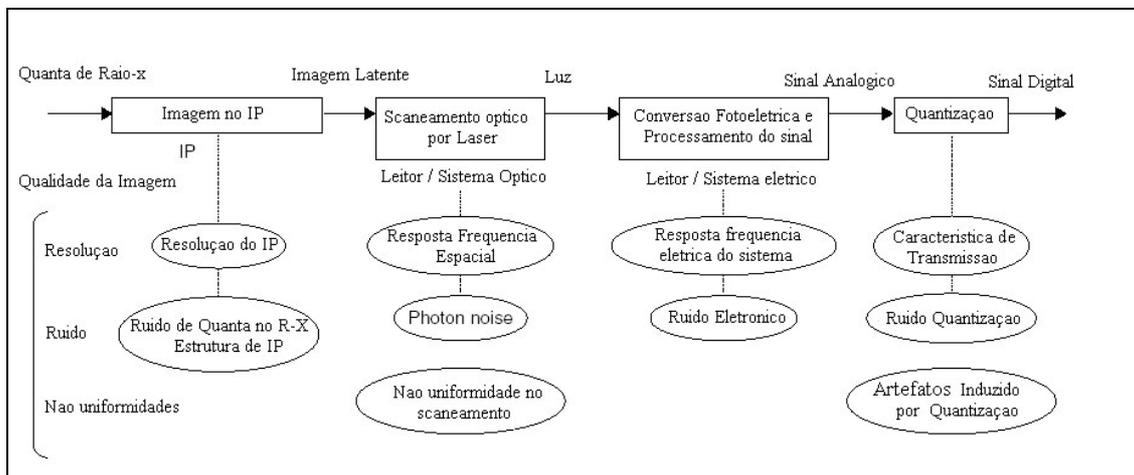


Figura 2.30 – Contribuição de ruído durante todo o processo de obtenção da radiografia (OLIVEIRA, 2004).

2.3.3.3 – Razão Sinal-Ruído (SNR)

Como mencionado anteriormente, o ruído em um sistema eletrônico ou digital é qualquer sinal indesejado que interfere na detecção ou processamento do sinal desejado. Este ruído degrada o desempenho do sistema. Então, é importante determinar a razão entre o sinal desejado e o indesejado, ou a relação sinal-ruído. Quanto maior for a razão sinal ruído, maior qualidade de visualização de detalhes a imagem apresentará.

Em uma imagem digital, a razão sinal-ruído pode ser calculada através razão entre a média de certa região da imagem e seu respectivo desvio padrão, obtidos através dos programas de processamento de imagem. A razão sinal ruído é calculada pela equação 2.7.

$$SNR = \frac{S}{\sigma} \quad (2.7)$$

onde,

$$S = \frac{1}{ixj} \sum_{i,j} X_{i,j} = \bar{X} \quad (2.8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_{i,j} - \bar{X})^2}{(ixj) - 1}} \quad (2.9)$$

onde i e j são respectivamente o número de linhas e colunas da área utilizada para determinar a SNR, e $X_{i,j}$ são os valores de intensidade de cada ponto.

2.4 – PROCESSAMENTO DA IMAGEM

As funções de processamento de imagens digitais podem ser classificadas em duas classes, por escopo ou por resultado. Por escopo, está relacionado com técnicas de processamento. Por resultado, está relacionado com os tipos de resultado de cada técnica.

Através do diagrama mostrado na Figura 2.31 pode-se ter uma idéia melhor das classes de processamento por resultado.

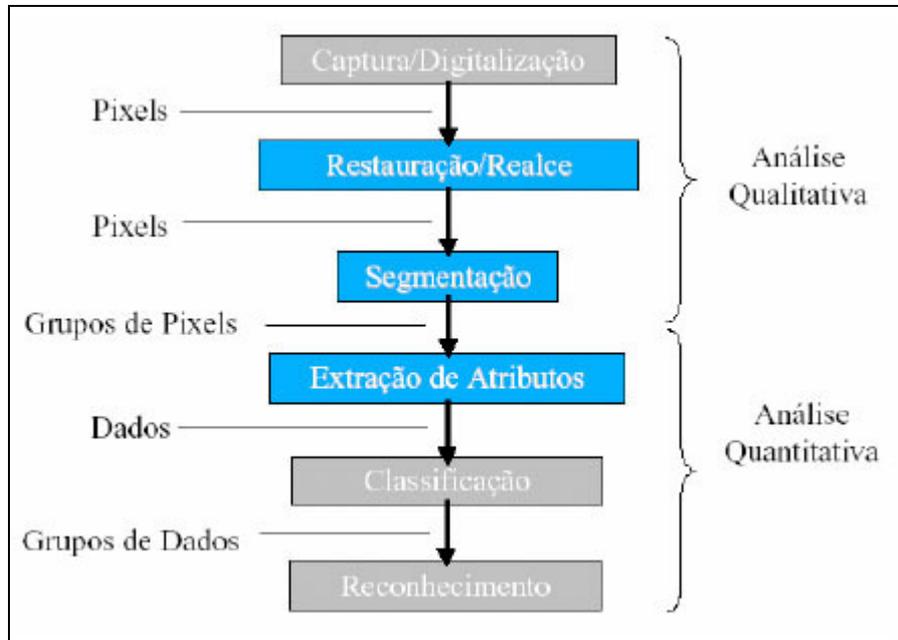


Figura 2.31 – Diagrama de seqüência do processamento digital (SCURI, 1999).

Há um fator comum em todas as classes de processamento: qualidade. Existem duas subdivisões em qualidade de imagem: fidelidade e inteligibilidade. No primeiro caso se está preocupado em aproximar a imagem processada da imagem original ou de um padrão estipulado que a melhor represente. No segundo caso, preocupa-se com a informação que se consegue extrair da imagem, seja pelo olho humano ou por algum processamento.

Programas para editoração eletrônica precisam ter um cuidado muito grande com a fidelidade na representação da cor da imagem. Já programas de processamento de imagens científicas em geral não estão preocupados com a fidelidade da cor e sim a informação contida na imagem.

2.4.1 – Restauração/Realce

Quando se está no contexto de editoração eletrônica, fica-se normalmente situado apenas no escopo de operações de realce ou obscurecimento e de restauração ou deformação.

A restauração busca compensar distorções específicas, normalmente geradas no momento de aquisição. Quando se pode identificar experimentalmente a função que representa a deformação ou construir um modelo matemático adequado, é possível buscar a função inversa e aplicá-la sobre a imagem deformada. Por exemplo: correção de foco, imagens borradas por movimento. Em todos os casos, a formulação matemática envolvida é extremamente complexa e o custo computacional muito alto. Os resultados podem ter conseqüências somente qualitativas.

2.4.2 – Segmentação

Quando se está no contexto de processamento de imagens científicas, o mais comum é querer obter dados relacionados com os objetos presentes na imagem. Então são necessárias as operações de segmentação que procurarão isolar regiões de pontos, e operações de extração de atributos que vão olhar para essas regiões e calcular uma série de parâmetros que as descreverão.

2.4.3 – Extração de Atributos

Utilizando imagens binárias é muito simples obter dados relevantes, ou atributos, das regiões segmentadas, tais como:

- a) número total de objetos;
- b) propriedades geométricas, do tipo: área, perímetro, centro de gravidade, largura máxima e mínima;
- c) atributos relacionados à forma, tais como: circularidade e concavidade;
- d) propriedades de luminância, tais como: nível de cinza médio de cada região (1º momento da distribuição), desvio padrão do nível de cinza (2º momento da

distribuição), outros momentos estatísticos da distribuição de cada região;

As propriedades geométricas são medidas diretamente sobre a imagem binária. As de luminância são obtidas da imagem original, a partir da informação de posição dos diversos objetos, fornecida pela imagem binária.

2.4.4 – Operações Pontuais

Operações pontuais são operações em que um ponto da imagem resultante depende apenas do mesmo ponto na imagem original. Neste caso, a única informação que se tem é a cor do ponto. Por isso, muitas das operações pontuais são operações que alteram características de cor e luminância, tais como: brilho, contraste, nível de branco e nível de preto, saturação, correção gama, limiar (*threshold*), posterização, solarização, negativo, etc. A Figura 2.32 mostra a representação de uma operação pontual.

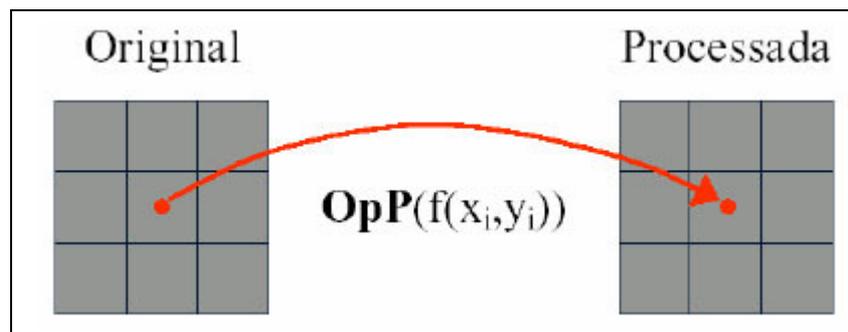


Figura 2.32 – Operações pontuais na imagem digital (SCURI, 1999).

Embora as funções pontuais estejam restritas somente ao ponto sendo processado, o processamento em si pode levar em consideração dados globais da imagem, como por exemplo, o histograma.

O histograma é uma função estatística da imagem que para cada nível de tonalidade, calcula-se quantos pontos existem naquela tonalidade. Muitas operações pontuais usam o histograma como parâmetro de decisão para fornecer resultados diferentes para o ponto da imagem processada. A Figura 2.33 mostra um exemplo de histograma de uma imagem monocromática.

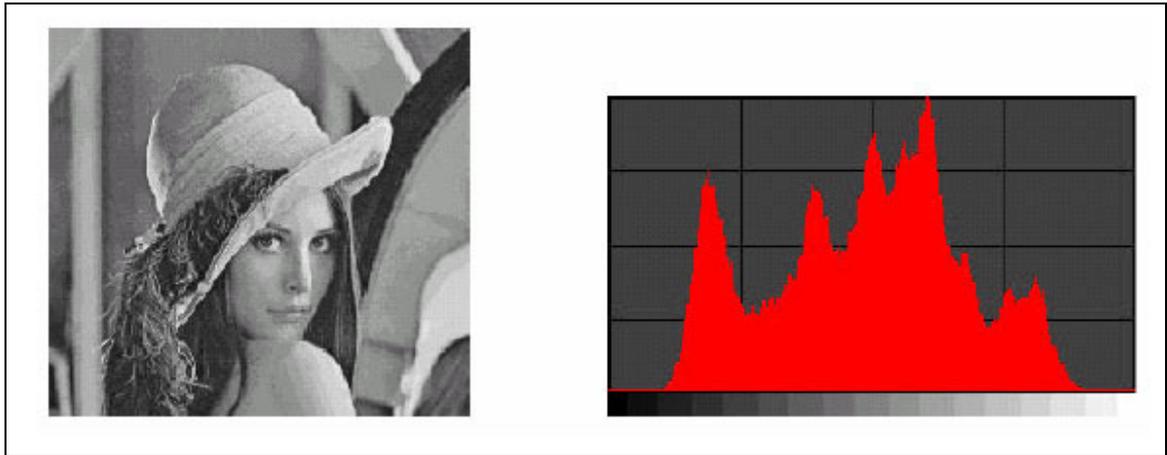


Figura 2.33 – Histograma de uma imagem monocromática (SCURI, 1999).

2.4.5 – Operações Locais

Operações locais são operações em que um ponto da imagem resultante depende de uma vizinhança do mesmo ponto na imagem original. As operações locais mais comuns são as operações de filtragem que usam uma convolução com um kernel de dimensão $n \times n$, onde n é tipicamente 3, 5, 7 e 9, mas pode assumir qualquer valor. Por exemplo, no caso de $n = 3$ é muito fácil de entender. Cada ponto da vizinhança 3×3 do *pixel* na imagem original é multiplicado por um valor e todos esses valores são somados resultando no ponto novo, como pode ser visto na figura 2.34. Os valores que ponderam a vizinhança são armazenados em uma matriz chamada kernel de convolução. Operações de *Blur*, *Sharpen*, detecção de bordas e muitas outras são implementadas dessa forma.

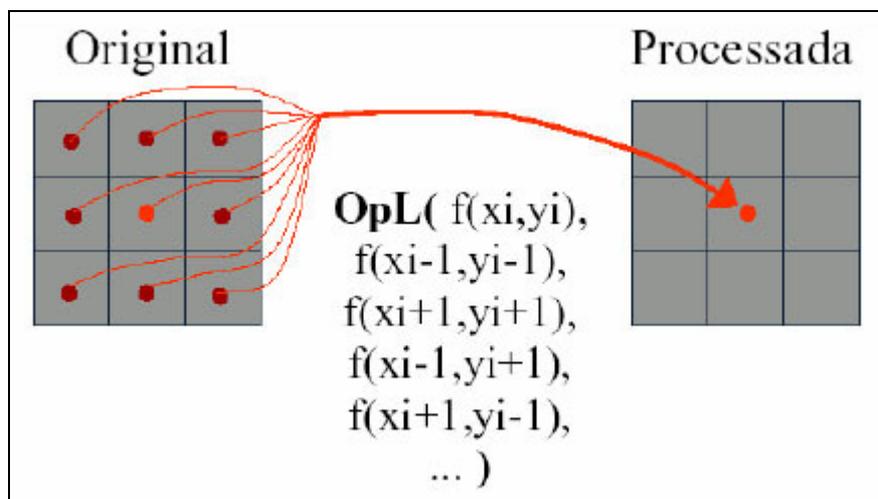


Figura 2.34 – Operações locais (SCURI, 1999).

2.4.6 – Operações Globais

Operações globais são operações em que um *pixel* da imagem resultante depende de um processamento realizado em todos os *pixels* da imagem original. Neste grupo de operações estão as transformadas de domínio, tais como a Transformada de Fourier, a Transformada de Wavelets (que na realidade são muitas, dependem de que *wavelet* está sendo usada) e a Transformada de Hough.

Todas essas transformadas nos dão informações muito interessantes sobre a imagem original. A Transformada de Fourier, por exemplo, é base fundamental para toda teoria de processamento de sinais e com ela pode-se realizar uma série de operações muito importantes com imagens. A Transformada de Wavelets irá decompor a imagem em uma estrutura de multiresolução, que é muito utilizada para compressão de imagens. A Transformada de Hough procura identificar formas geométricas na imagem, tais como retas e círculos. Esse grupo de operações é visto somente em programas de processamento de imagens científico.

2.5 – MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são formados por uma estrutura de reforço inserida em uma matriz, onde o produto final apresenta uma combinação de propriedades dos seus constituintes. O reforço geralmente é feito por fibras, que apresentam alta resistência à tração e a matriz une as fibras de forma a permitir que as tensões sejam transferidas para a fibra, resultando num material reforçado (CALLISTER, 2002).

O compósito é projetado de modo que as cargas a que a estrutura é submetida em serviço sejam suportadas pelo reforço. Suas propriedades dependem da matriz, do reforço e da interface. Desta forma, muitas variáveis precisam ser consideradas ao se projetar um compósito: o tipo de matriz (metálica, cerâmica e polimérica), o tipo de reforço (fibras ou partículas), suas proporções relativas, a geometria do reforço, método de cura e a natureza da interface. Cada uma destas variáveis deve ser cuidadosamente controlada a fim de produzir um material estrutural otimizado para as circunstâncias nas quais será usado (GIBSON, 1994).

Os compósitos de matriz metálica, polimérica e cerâmica ocupam posições de destaque no campo dos materiais avançados, graças às suas elevadas resistência e rigidez específicas. Os compósitos avançados reduzem problemas de fadiga, possuem maior flexibilidade, resistência à corrosão e ao desgaste, o que conduz a custos mais baixos de ciclo de vida do produto.

Os materiais compósitos estão sendo empregados cada vez mais em substituição aos materiais tradicionais, cujas características individuais não atendem às crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade. Os materiais compósitos vêm sendo testados e tem apresentado desempenho superior ao de estruturas metálicas convencionais.

Os materiais poliméricos são os mais usados em uma ampla diversidade de aplicações dos compósitos, devido as suas propriedades à temperatura ambiente, da sua facilidade de fabricação e de seu custo (**CALLISTER, 2002**).

2.5.1 – Matriz Polimérica

Os compósitos poliméricos, também denominados plásticos reforçados, são materiais formados por uma matriz polimérica e um reforço. Entre as vantagens do compósito polimérico estão: baixo peso, resistência à corrosão e ótimas propriedades mecânicas quando comparados com alguns materiais convencionais de engenharia.

A função da matriz polimérica assim como das demais matrizes é transferir o carregamento aplicado no material para as fibras, mantê-las ancoradas e agrupadas, e protegê-las contra danos superficiais (abrasão mecânica ou reações com o ambiente), o que contribui no controle das propriedades do compósito (**GIBSON, 1994**).

As matrizes poliméricas podem ser termorrígidas ou termoplásticas. As termoplásticas amolecem com o aquecimento e eventualmente fundem, e endurecem quando resfriadas e as termorrígidas são formadas por uma reação química interna entre a resina e o endurecedor ou a resina e o catalisador, sofrendo uma reação não reversível formando um produto duro e infusível, que se degrada com o aquecimento (**PILATO et**

al, 1994).

As resinas poliméricas termorrígidas mais amplamente utilizadas para aplicações estruturais na indústria são as resinas poliéster, vinil éster e epóxi. As poliéster e vinil éster tem um custo menor. Já as resinas epóxi são mais caras e, além de aplicações comerciais, também são muito utilizadas em compósitos de matriz polimérica para aplicações aeroespaciais, por que possuem melhores propriedades mecânicas e melhor resistência à umidade do que as anteriores (CALLISTER, 2002). Na Tabela 2.1 pode ser observada as características de cada uma dessas matrizes, sendo que cada uma delas apresenta características particulares quanto ao processamento e desempenho (ASTROM, 2000).

Tabela 2.1 – Características de matrizes termorrígidas usadas em aplicações estruturais (ASTROM, 2000).

Sistema	Poliéster	Vinil Éster	Epóxi
Tipo de Resina	Ortoftálica, isoftálica, halogenada	Epóxi novolac, resinas epóxi éster de bisfenol	Epicloridrina/bisfenol-A
Tipo de Indicador	Peróxido orgânico	Peróxido orgânico	Aminas e ácidos anidrido
Volume de Concentração	7-9 %	7-9 %	1-4 %
Adesão Interfacial	Baixa	Média	Alta
Propriedades Mecânicas	Baixa	Média	Alta
Resistência à Fadiga	Média	Média	Alta
Resistência Química	Média	Alta	Média

2.5.2 – Sistemas de Dutos Compósitos

O material mais importante é o Fibra de Vidro Reforçado com Epóxi (GRE), que vem sendo utilizado *onshore* para aplicações de baixa e alta pressão com uma grande variedade de fluídos, incluindo hidrocarbonetos (STRINGFELLOW, 1992). Já nas aplicações *offshore* vem sendo utilizados somente em sistemas aquosos de baixa pressão, como do tipo mostrado na Figura 2.35 (GIBSON, 2000).



Figura 2.35 – Sistema de tubos GRE em uma plataforma *offshore* (GIBSON, 2000).

Apesar de dutos GRE apresentarem a melhor resistência química vários outros tipos de resinas podem também ser usados. Isso inclui:

- a) Poliéster Isoftálico, para produtos de aplicação geral;
- b) Vinil Éster, que geralmente mostram resistência a corrosão próxima ao epóxi; e
- c) Fenólico (incluindo fenólico/siloxano).

Tubos de fibra de vidro são fabricados por enrolamento filamental. O enrolamento filamental é um processo que resulta em um material descontínuo, usualmente com ângulo das fibras próximo ao ótimo para aplicações de pressão, que é $\pm 55^\circ$. Alternativamente, para diâmetros pequenos, alguns fabricantes empregam o

processo de enrolamento contínuo.

2.5.3 – Resina Epóxi

Resinas epóxi são polímeros de peso molecular relativamente baixo capaz de ser processado sob uma variedade de condições. Duas vantagens importantes dessas resinas sobre resinas de poliéster não saturadas são: primeiro estas podem ser parcialmente curadas e armazenadas neste estado e segundo estas exibem pouco encolhimento durante a cura. Entretanto, a viscosidade de resinas epóxi convencionais é maior, e estas são mais caras comparadas com resinas poliéster. As resinas curadas possuem alta resistência química e a corrosão, boas propriedades térmicas e mecânicas, excelente adesão a uma variedade de substratos e boas propriedades elétricas. Sua maior limitação é o alto tempo de cura e a baixa performance em ambientes quentes e úmidos. Aproximadamente 45% do total de resinas epóxi produzidas são usados em capas protetoras. Enquanto o restante é usado em aplicações estruturais como laminados e compósitos, ferramentaria, moldagem, fundição, construção, adesivos etc (**VARMA et al, 2000**).

Os sistemas de resina epóxi são constituídos geralmente por dois ingredientes distintos, que devem ser misturados logo antes de seu processamento. Um destes ingredientes é o epóxido ou a “resina” do sistema. Apesar dos elementos constitutivos da molécula possam variar, para que se atinjam certas propriedades finais, a característica chave é o epóxido ou estrutura anelar de cada molécula, e o fato de que há certo número de grupos –OH presentes na cadeia. A ligação cruzada pode envolver tanto os grupos finais quanto os grupos de hidroxila (grupos –OH).

O segundo ingrediente da resina é um endurecedor, que é geralmente uma amina primária e secundária ou ácido anidrido. Para a laminação úmida e enrolamento filamentar, para a maior parte do uso *offshore*, epóxidos curados com amina são preferenciais. Dois tipos de aminas podem ser utilizados, aminas alifáticas e aminas aromáticas.

As aminas aromáticas produzem as melhores propriedades químicas e mecânicas em altas temperaturas, mas são mais caras. Aminas alifáticas são menos caras e, abaixo de 100°C, as propriedades de sua resina curada são tão boas quanto as propriedades das aminas aromáticas. No entanto, elas requerem um processo de cura posterior cuidadoso.

Epóxidos Anidridos curados possuem excelentes propriedades e são usados em sistemas pré fabricados (*prepegs*) para fins aeroespaciais e em grandes quantidades em sistemas de tubulações.

No caso de *prepegs* de epóxido, o reforço está impregnado com resina, permitindo que a cura alcance um estágio intermediário, onde ele é parado. O *prepeg* é então mantido em baixa temperatura até que se precise dele para modelar (SPAGNI, 1998).

2.5.4 – Reforço

Os reforços compósitos podem ser divididos em três tipos: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. A fase dispersa para compósitos reforçados com partículas tem eixos iguais, isto é, as dimensões das partículas são aproximadamente as mesmas em todas as direções; para os compósitos reforçados com fibras, a fase dispersa tem a geometria de uma fibra, que podem ser de acordo com o seu comprimento curtas ou longas.

Os compósitos reforçados com fibras longas são tecnologicamente mais importantes que os de fibras curtas, pois incluem com frequência resistência e/ou rigidez alta em relação ao seu peso. Diversos fatores influenciam as propriedades finais do compósito reforçado com fibras longas, tais como: o comprimento, a orientação e concentração (fração volumétrica) da fibra, além da orientação da tensão aplicada, se longitudinal (força aplicada paralela à orientação da fibra) ou transversal (força perpendicular à orientação da fibra) (CALLISTER, 2002).

Existem diversos tipos de fibras contínuas utilizadas como reforço, a depender do propósito a que se destinam e das propriedades desejadas para o produto final, dentre

as quais, as mais utilizadas em aplicações estruturais com matriz poliméricas são: fibras vidro, carbono e aramida, sendo que esta última não é indicada para utilização em *risers*, devido à perda das suas propriedades mecânicas em presença de umidade.

2.5.5 – Fibras de Vidro

As fibras de vidro ocupam posição de grande importância entre os materiais de reforço usados pela indústria dos plásticos. Sendo comercializadas desde a década de 40, elas têm permitido a crescente evolução dos plásticos reforçados em aplicações antes reservadas aos metais e suas ligas. As principais características da fibra de vidro, que as tornam atraentes para o reforço de plásticos, em relação a outras fibras, são: baixo coeficiente de dilatação térmica, altas propriedades mecânicas, retenção das propriedades mecânicas em altas temperaturas, alto alongamento na ruptura, facilidade de processamento e baixo custo (CARVALHO, 1992).

As fibras de vidro são obtidas pela fusão e fiberização de óxidos metálicos (óxidos de silício, sódio, cálcio, alumínio, potássio, entre outros). Esses óxidos são analisados, moídos, dosados, misturados e alimentados em fornos de fusão para posterior transformação em fibras (CARVALHO, 1992). Elas se dividem em três categorias de acordo com suas características em: E “*Electrical*” (elétrico), C “*Chemical*” (químico) e S “*High Tensile Strength*” (alta resistência) (FIORELLI, 2002).

2.5.6 – Fabricação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica

Para fabricar compósitos reforçados com fibras contínuas que atendam à determinadas especificações de projeto, as fibras devem estar distribuídas uniformemente no interior da matriz. Nesta seção serão discutidas técnicas de laminação através das quais são produzidos os materiais para desenvolvimento deste trabalho.

2.5.6.1 – Laminação Manual (“Hand-lay-up”)

No processo de laminação manual as mantas e/ou os tecidos de fibras são colocados manualmente sobre o molde e impregnados com resina catalisada e acelerada. A resina, no estado líquido, é aplicada manualmente com rolos ou pincéis, utilizados no auxílio da impregnação e na retirada de bolhas de ar (CARVALHO, 1992).

Esse processo, mostrado na Figura 2.36, consiste em aplicar sucessivamente dentro da superfície do molde: inicialmente um agente desmoldante, uma camada de resina líquida termofixa e uma camada de reforço que deve ser impregnado na resina com o auxílio de um rolo ou pincel. Esse processo deve ser repetido até que se tenha a espessura desejada do laminado (vetrotex).

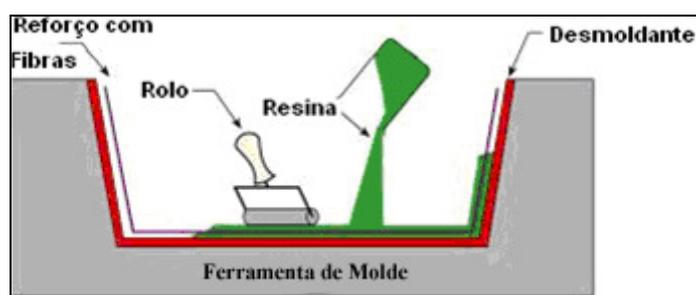


Figura 2.36 – Representação do processo de laminação manual (FARO, 2008).

2.5.6.2 – Enrolamento Filamentar (“Filament Winding”)

O enrolamento filamentar é um processo de laminação segundo o qual, fibras de reforço contínuas são posicionadas de maneira precisa e com a orientação necessária, de acordo com um padrão predeterminado, para compor uma forma oca, impregnadas com resina termorrígida, na quantidade necessária para construção da estrutura desejada (CALLISTER, 2002), e é usado principalmente para construção de formas cilíndricas como tanques, tubos ou dutos.

A construção do compósito cilíndrico por enrolamento filamentar consiste em três etapas principais: a primeira é o projeto, os quais incluem a seleção de materiais, geometria e orientações da fibra; o segundo, os meios mecânicos de colocação das fibras através dos quais elas são colocadas em posições apropriadas, e o terceiro é a

seleção e o controle das condições que devem ser mantidos durante o processo de fabricação (ABDALLA *et al*, 2007).

As fibras contínuas (*rovings*) dispostos em uma prateleira, através de sistemas de tensão e guia, são desenroladas sob condições controladas e passadas em sistemas de “imersão completos” que impregnam e controlam a quantidade de resina nos filamentos.

Os filamentos são então enrolados sobre um molde rotatório (mandril) em várias camadas, como ilustrado na Figura 2.37. Após essa fase de enrolamento úmido, o mandril com a estrutura compósita é removido, sempre em rotação, para ser polimerizado em um forno ou à temperatura ambiente (FARO, 2008).

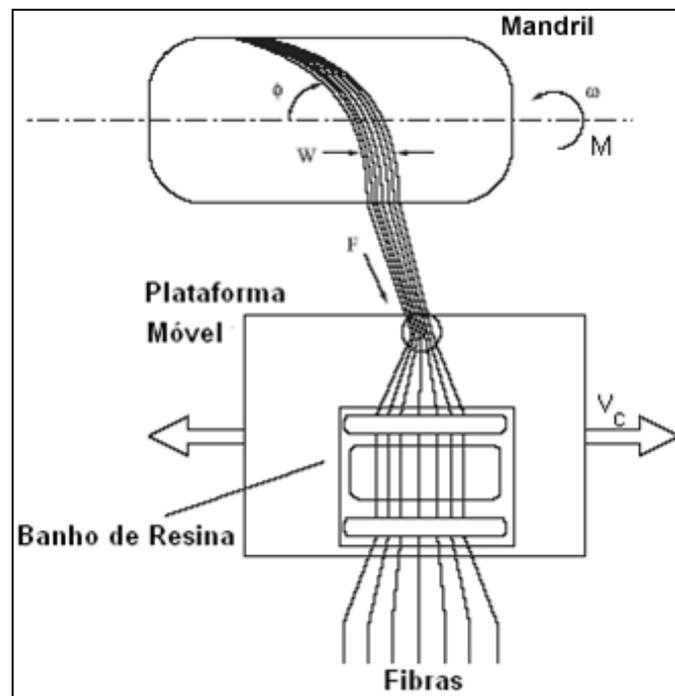


Figura 2.37 – Esquema do processo de enrolamento filamental (FARO, 2008).

Existem dois diferentes métodos de enrolamento: (1) *wet winding*, nos quais as fibras são passadas através de um banho de resina e enroladas em um mandril rotatório; (2) *prepreg winding*, nos quais as fibras pré-impregnadas são colocadas sobre o mandril rotatório. Entre esses métodos de enrolamento, o *wet winding* é o mais comum, extensamente usado na fabricação de cilindros compósitos de matriz termorrígida reforçado com fibras e possui maiores vantagens que o anterior, como: baixo custo do

material, curto tempo de enrolamento e o tipo da resina pode ser variado de acordo com os requerimentos específicos (ABDALLA *et al.*, 2007).

2.6 – Radiografia em Dutos Compósitos

A técnica radiográfica é bastante útil para a detecção de variações de espessura, penetração da água, deposição de incrustações e alguns vazios e áreas de falta de adesivo, além da presença de danos por impacto, poros ou inclusões e outros defeitos volumétricos. Podem ainda ser detectadas trincas, desalinhamentos de montagem e excesso de adesivo na raiz das juntas coladas (ISO 14692-4, 2002). A técnica radiográfica não é sensível à rugosidade superficial, mas sim à orientação do defeito.

Os parâmetros radiográficos do ensaio (isto é, tensão do tubo de raios X e tempo de exposição) devem ser ajustados, em comparação ao aço, devido à baixa densidade dos polímeros e compósitos. Tensões baixas a médias são adequadas para a radiografia do GRE (NORSOK, 1994). Podem também ser usados isótopos de baixa atividade.

Vazios na colagem (camada adesiva) aparecem como áreas escuras no filme. Os defeitos são fáceis de detectar, pois há um espaço de ar entre as partes coladas. Se o espaço de ar é inferior a 0,5 mm, os vazios serão muito difíceis de detectar. No entanto, é muito difícil detectar a falta de adesivo sem modificá-lo, acrescentando a este elementos pesados, que funcionam como geradores de contraste. ZnI_2 , $BaSO_4$, PbO , e W funcionam bem para este fim (NORSOK, 1994). A Figura 2.38 mostra a imagem de uma junta colada com a adição de ZnI_2 ao adesivo.



Figura 2.38 – Detecção de áreas de *disbonding* graças a adição de ZnI_2 no adesivo (MARINHO *et al.*, 2009).

Como dito anteriormente, os isótopos radioativos utilizados para a inspeção de materiais compósitos deve possuir baixa atividade. Fontes de Yb-169 e Se-75 são as mais indicadas para as inspeções, porém o Ir-192 também é utilizado, principalmente para espessuras e diâmetros maiores.

Como nenhum indicador de qualidade de imagem está atualmente disponível para verificar a sensibilidade em juntas coladas GRE, é muito importante que um filme de grão fino e uma fonte com pequeno tamanho focal sejam utilizados (NORSOK, 1994).

2.6.1 – Juntas coladas

A geometria de exposição utilizada normalmente é a PDVS como descrito em ASME Boiler and Pressure Vessel Code, seção V, artigo 2.

Em tubos com diâmetro externo superior a 8 polegadas são usados filmes de tamanho 30 cm x 40 cm. Para tubos menores podem ser usados filmes de tamanho 10 cm x 24 cm.

Na prática, duas juntas podem ser expostas em um filme, porém as juntas têm que ter diferentes números de identificação. Em tubos com diâmetro externo inferior a 152,4 mm (6 pol), filmes classe II e uma fonte radioativa, com 10 Ci a 12 Ci é a indicada. Para juntas coladas a densidade óptica do filme deve estar entre 2,0 e 3,5 (NORSOK, 1994).

2.6.2 – Acoplamentos mecânicos

A geometria de exposição utilizada é a PDVS. Os filmes têm de ser colocadas sob os parafusos (em contato direto com a superfície externa) e alinhado com precisão, bem no centro do acoplamento. O alinhamento do filme é muito importante, já que os critérios de aceitação são dependentes do filme ser colocado no centro do acoplamento. Como a sensibilidade não é crítica, filmes Classe I podem ser utilizados. Para acoplamentos mecânicos a densidade deve ser entre 1,5 a 4,0 (NORSOK, 1994).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os equipamentos e corpos de prova utilizados na execução deste estudo, assim como a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 – CORPOS DE PROVA

Os testes foram realizados em corpos de prova de dois diâmetros (4 e 16 polegadas) fornecidos pela empresa Ameron, com tipos diferentes de defeitos, conforme a seguir:

a) 16 polegadas

- seis corpos de prova com falta de adesivo;
- seis corpos de prova com falta de adesão;
- seis corpos de prova sem defeito.

Estes corpos de prova consistem em juntas coladas de tubos de 16 polegadas de diâmetro, cortados a 60°. A Figura 3.1 mostra os corpos de prova utilizados nesta etapa e a Figura 3.2 mostra as dimensões e os cortes realizados para a confecção dos mesmos.



Figura 3.1 – Corpos de prova de 16 polegadas cortados.

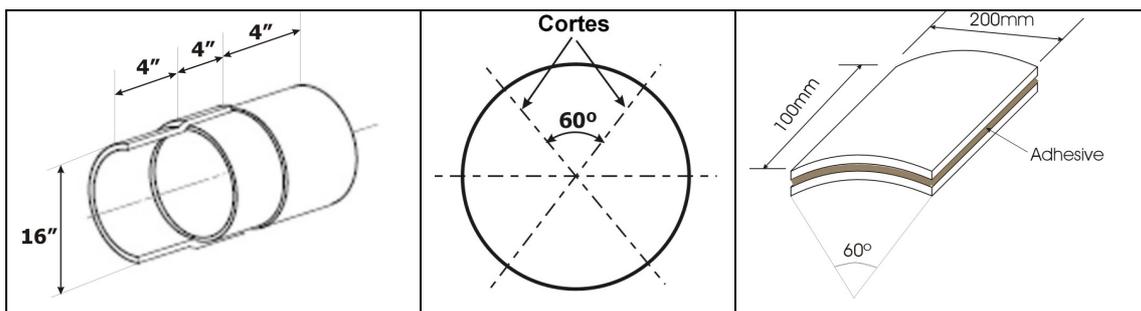


Figura 3.2 – Dimensões e cortes dos tubos de 16 polegadas.

A falta de adesão foi simulada através de uma fita adesiva colocada na superfície da junta antes de aplicado o adesivo gerando uma área onde o adesivo não irá aderir a superfície a ser colada, como mostra a Figura 3.3.

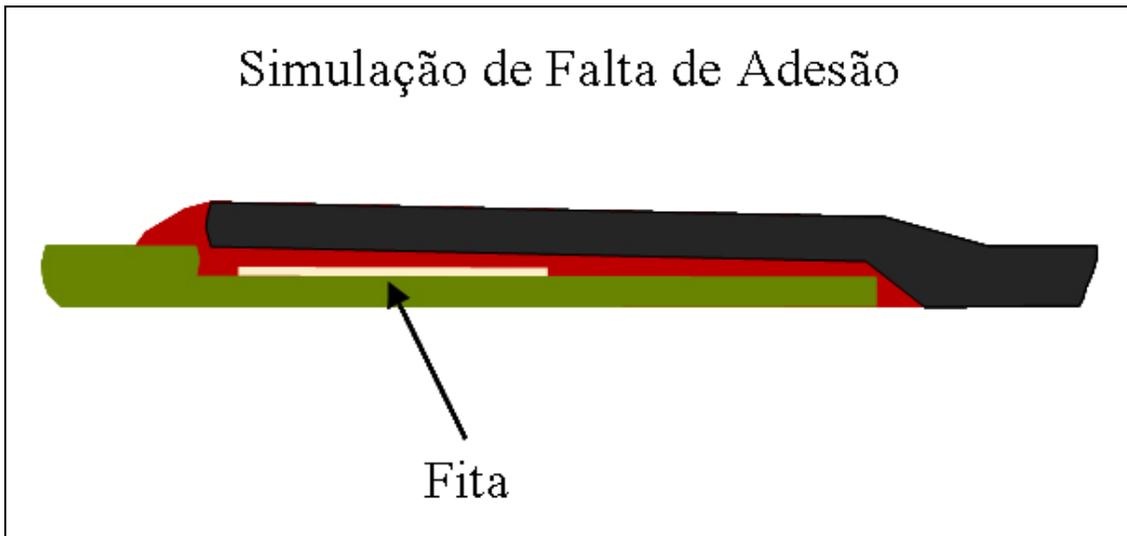


Figura 3.3 – Método de simulação de falta de adesão.

A falta de adesivo será simulada colocando uma quantidade menor de adesivo (30% menos que o procedimento indica) e não será homogeneizado por toda a superfície gerando assim áreas onde o adesivo não irá preencher o espaço destinado a ele para efetivar a colagem da junta, como mostra a Figura 3.4.

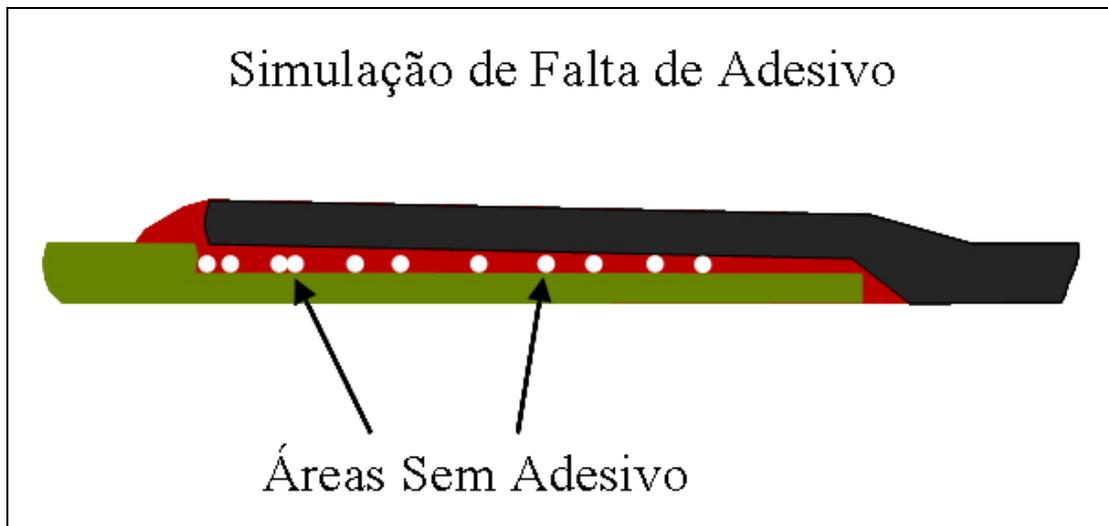


Figura 3.4 – Método de simulação de falta de adesivo.

Foi utilizado ainda um corpo de prova de junta já colada, sem cortes e sem defeitos. Para os ensaios com esta peça, esta foi dividida em quatro partes, utilizando marcadores numerados de chumbo de 0 a 3. A Figura 3.5 mostra esta junta colada.



Figura 3.5 – Junta colada de 16 polegadas

b) 4 polegadas

- uma peça colada sem defeitos e sem corte;
- três peças descoladas e sem cortes, já com as extremidades dos dutos prontas para a colagem;

A Figura 3.6 mostra as peças de 4 polegadas.



Figura 3.6 – Corpos de Prova de 4 polegadas.

Foi confeccionado ainda um corpo de prova, que consiste em uma peça cortada e colada com vazios inseridos em forma de faixas horizontais e verticais. A Figura 3.7 mostra a peça em questão e a Figura 3.8 mostra o esquema de posicionamento dos vazios.



Figura 3.7 – Corpo de prova com defeitos inseridos.

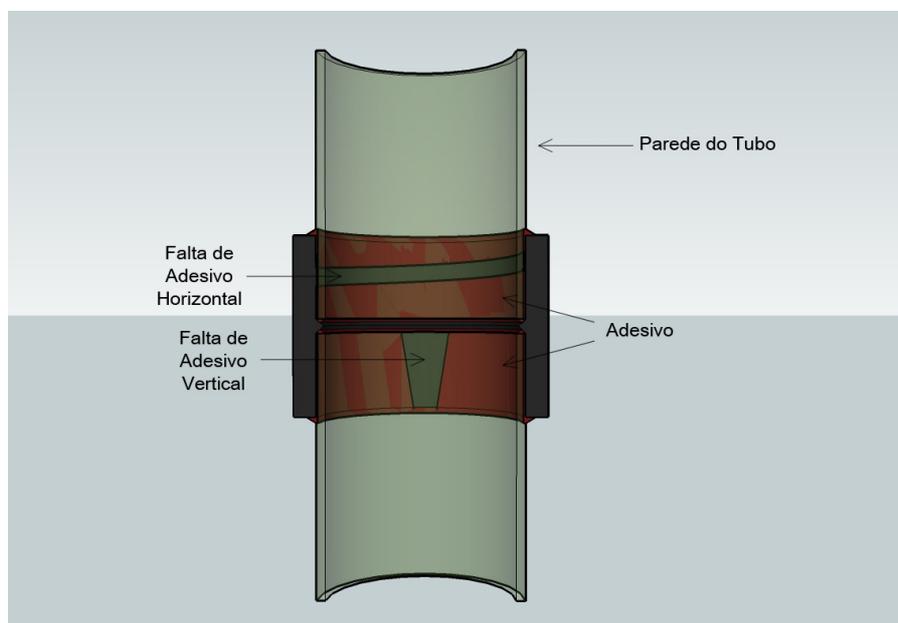


Figura 3.8 – Esquema de posicionamento dos defeitos.

Foi fornecido juntamente com as peças, kits de adesivo PSX-60 para a colagem das juntas de dutos de 4 polegadas. O kit de adesivo epóxi PSX 60 contém uma resina adesiva, endurecedor e espátula para mistura. O adesivo é uma pasta vermelha com enchimento de areia e o endurecedor adesivo é uma pasta branca. PSX 60 é um adesivo siloxano epóxi formulado para ligação permanente de tubulações e articulações de fibra de vidro.

3.2 – INDICADORES DE QUALIDADE DE IMAGEM (IQI)

3.2.1 – Resolução Espacial

Analogamente a radiografia computadorizada em materiais metálicos, para materiais compósitos também há a necessidade de obter o valor da resolução espacial básica, embora não existam normas que indiquem um valor específico como requisito de qualidade. Assim, o IQI para levantamento da resolução espacial básica será o mesmo utilizado para avaliar imagens de outros materiais, ou seja, o IQI de fio duplo, de acordo com a Norma Européia EN 462-5.

O IQI de fio duplo consiste em uma barra fabricada em plástico, onde treze pares de fios metálicos são colocados. Os pares de fios correspondentes aos números 1D à 3D são fabricados em tungstênio, os outros são fabricados em platina, e as dimensões devem corresponder ao especificado na norma. O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro do mesmo. A Figura 3.9 mostra o IQI de fio duplo. A Tabela 3.1 mostra a numeração dos elementos, a penumbra correspondente, o diâmetro dos fios, a tolerância permitida e o correspondente em pares de linha por milímetro (pl/mm).

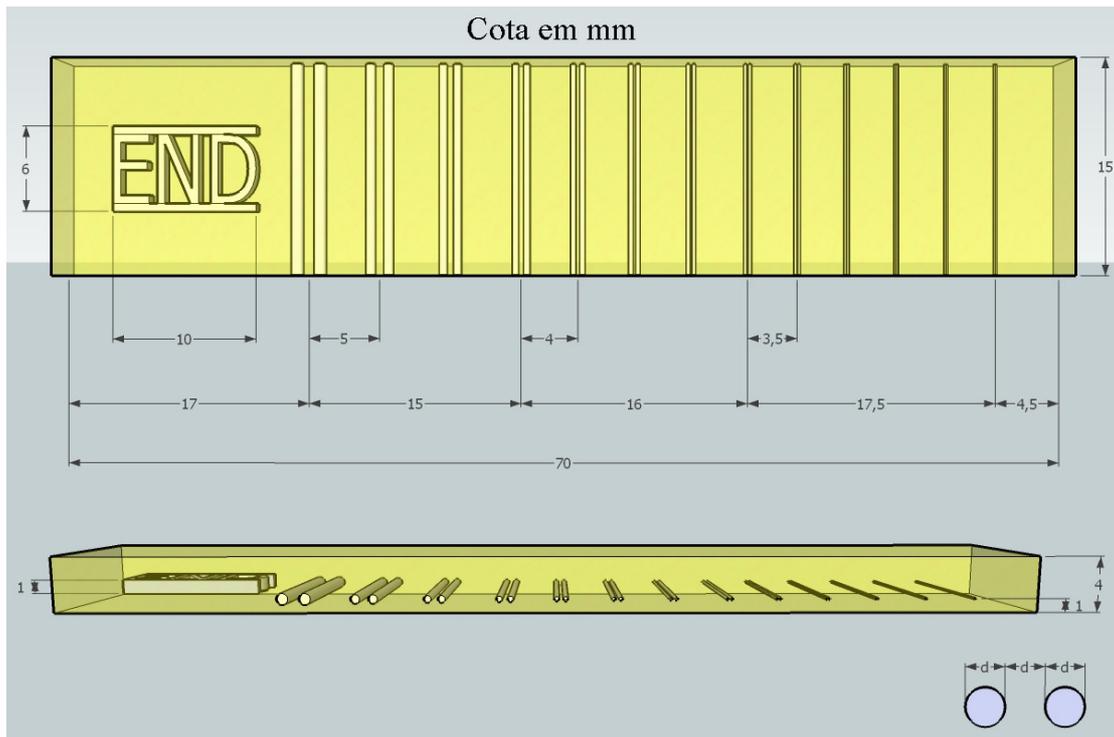


Figura 3.9 – Indicador de qualidade de fio duplo.

Tabela 3.1 – Parâmetros do Indicador de Qualidade de Imagem.

Elemento	Penumbra (mm)	Diâmetro do fio (mm)	Tolerância	Pl/mm
13D	0,10	0,050	± 0,005	10,000
12D	0,13	0,063		7,936
11D	0,16	0,080		6,250
10D	0,20	0,100		5,000
9D	0,26	0,130		3,846
8D	0,32	0,160	± 0,01	3,125
7D	0,40	0,200		2,500
6D	0,50	0,250		2,000
5D	0,64	0,320		1,563
4D	0,80	0,400	± 0,02	1,250
3D	1,00	0,500		1,000
2D	1,26	0,630		0,794
1D	1,60	0,800		0,625

Para obter a resolução espacial do sistema, primeiramente deve ser traçado o perfil de linha na imagem do IQI. O perfil de linha gera um gráfico dos valores de cinza em função da distância, como pode ser visto na Figura 3.10.

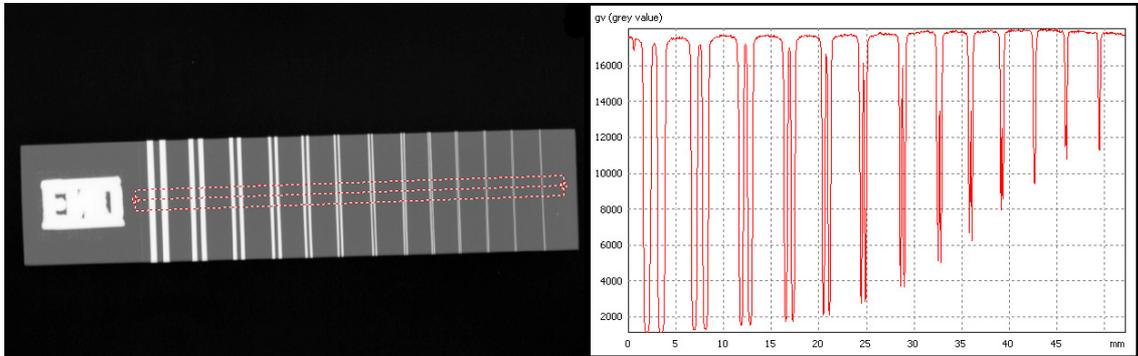


Figura 3.10 – Perfil de linha do IQI de fio duplo.

O valor da resolução espacial básica é definido como a metade do valor da penumbra do primeiro par de fios que não pode ser resolvido, ou seja, quando a separação entre os fios não pode ser visualizada. O primeiro par de fios não resolvido é determinado quando a diferença entre os valores de máximo e mínimo de intensidade é menor do que 20% de sua intensidade máxima, conforme a Figura 3.11, sendo este o limite de discernibilidade do sistema.

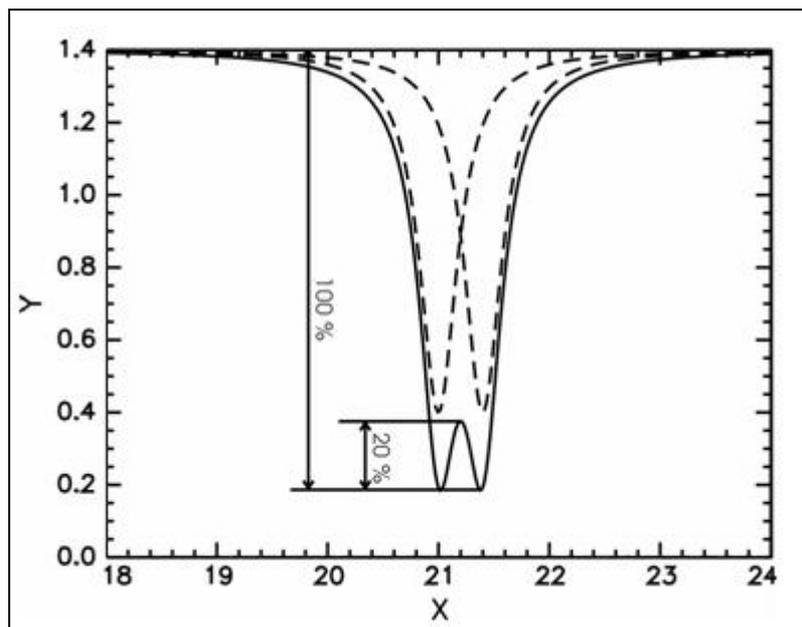


Figura 3.11 – Perfil de linha de um par de fios mostrando a diferença de pelo menos 20% dos valores de máximo e mínimo de intensidade entre os dois fios.

3.2.2 – Sensibilidade

Como não existem IQIs (indicadores de qualidade de imagem) específicos para estes materiais, foi confeccionado um IQI que atuará como padrão de sensibilidade das imagens radiográficas.

Este IQI consiste em uma pequena chapa do material adesivo com 1,00 mm de espessura, contendo furos passantes de 1,00 mm e 2,00 mm de diâmetro. Este padrão será utilizado para verificar a sensibilidade da imagem radiográfica quanto a presença de vazios na região do adesivo. A Figura 3.12 mostra o padrão de sensibilidade.

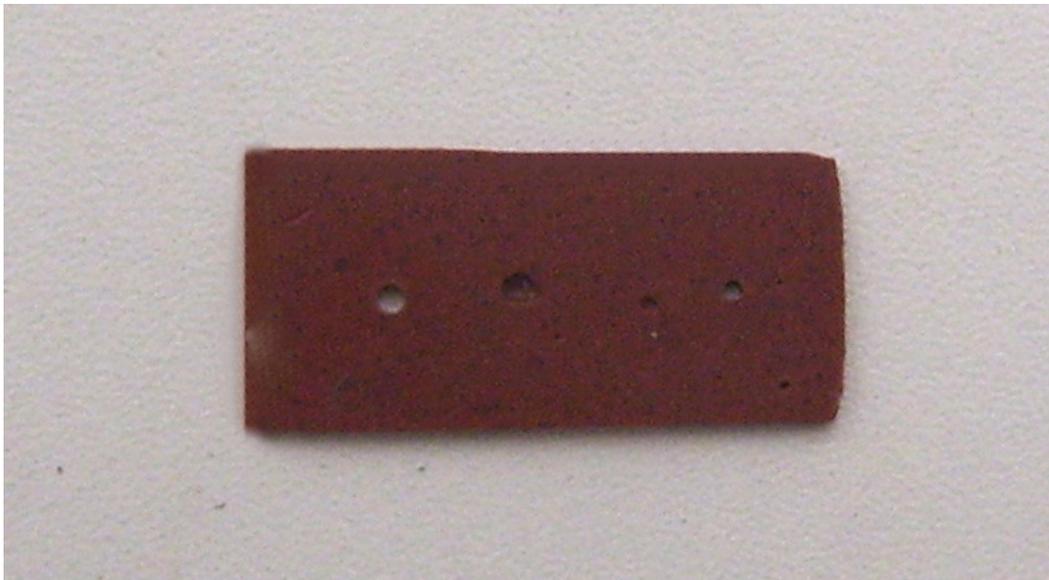


Figura 3.12 – Padrão de material adesivo.

Para manter a espessura e a magnificação, o padrão foi posicionado entre a parede do tubo e um calço de mesmo material do tubo. A Figura 3.13 mostra o posicionamento do padrão no tubo.

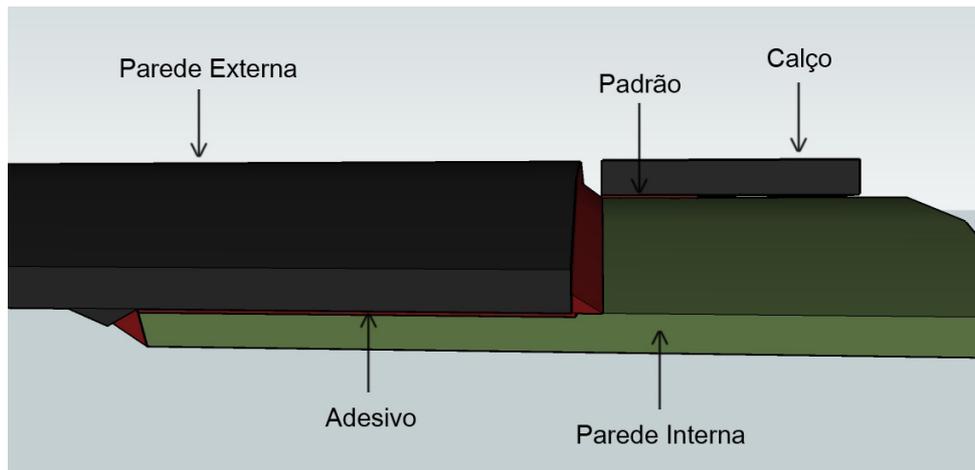


Figura 3.13 – Ilustração do posicionamento do padrão no tubo.

3.3 – ENSAIOS RADIOGRÁFICOS

Para os ensaios com os corpos de prova de 4 e 16 polegadas através da técnica de parede dupla vista simples (PDVS), foi utilizado um tubo de raios X de potencial constante, modelo CSD 160, fabricado pela Balteau. Este equipamento possui dois tamanhos de foco (0,4 mm e 3,0 mm), tensão máxima de 160 kV e corrente máxima de 35 mA.

As imagens foram obtidas por radiografia convencional e computadorizada para posterior comparação. Com a radiografia convencional, foi utilizado um filme classe I, modelo M100 fabricado pela Kodak. Após a revelação, o filme foi digitalizado pelo scanner modelo LS85, fabricado pela Kodak, com resolução de 198 DPI. A Figura 3.14 mostra o sistema de digitalização de imagens.



Figura 3.14 – Digitalizador de radiografias LS85.

Com radiografia computadorizada, foram usadas placas de fósforo modelos IP HD Plus, fabricado pela Durr e IPX, fabricado pela GEIT. A placa de fósforo IP HD Plus é uma placa de altíssima resolução devido a sua pequena granulação e espessura. Porém, pelo mesmo motivo, sua sensibilidade à radiação é baixa, sendo necessário trabalhar com tempos de exposição mais elevados. A placa de fósforo IPX é uma placa de boa resolução, com tamanhos de grãos e espessura maiores que a placa fabricada pela Durr. Isso permite que se trabalhe com tempos de exposição mais reduzidos, porém sem alcançar a mesma definição de imagem.

O sistema de radiografia computadorizada onde as placas foram escaneadas foi o CR50P, fabricado pela GEIT. Este sistema possui diferentes tamanhos de pixel, que podem ser selecionados pelo usuário, de acordo com a aplicação. O tamanho mínimo de pixel é de 50 μm , produzindo imagens com boa resolução espacial. Este equipamento permite ainda selecionar a tensão da fotomultiplicadora, numa faixa que varia de 300 a 1200 V. O aumento da tensão da fotomultiplicadora resulta em uma amplificação do sinal elétrico gerado, o que permite atingir a mesma intensidade na imagem utilizando um tempo de exposição menor. Nestes ensaios, o tamanho de pixel utilizado foi de 50 μm e o ganho da fotomultiplicadora foi de 450 V.

A Figura 3.15 mostra o filme M100, as placas de fósforo e o equipamento de radiografia computadorizada.



Figura 3.15 – Filme radiográfico, Placa de Fósforo Durr e IPX e CR50P.

Como algumas peças são cortadas, conforme mencionado anteriormente, estas foram posicionadas de forma a simular a geometria para a técnica de PDVS. A Figura 3.16 mostra a simulação de geometria empregada.

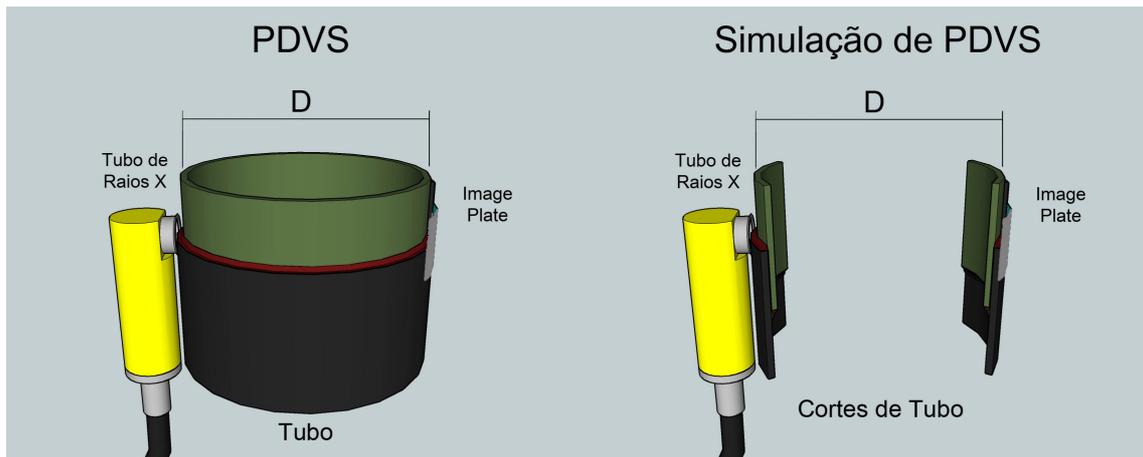


Figura 3.16 – Geometria de exposição para a técnica de PDVS.

3.4 – ENSAIOS COM CONTRASTE

Para os testes com contraste, foi utilizado um dos corpos de prova descolados de 4 polegadas. Estes foram cortados e colados com o adesivo, com uma mistura de adesivo e bário e com uma mistura de adesivo e iodo. Durante a colagem, foram gerados vazios no adesivo para simular descontinuidades. Todas as peças foram radiografadas com radiografia computadorizada, através da técnica de parede simples vista simples (PSVS), apenas para avaliar a influencia dos agentes de contraste na visualização dos defeitos. A Figura 3.17 mostra os corpos de prova confeccionados para este ensaio.



Figura 3.17 – Corpos de Prova de 4 polegadas com contraste.

3.5 – ENSAIOS COM MAGNIFICAÇÃO

Nesta etapa foram obtidas imagens com a técnica de PSVS para avaliar a influência da magnificação na detectabilidade de descontinuidades no adesivo. Para isso, foi utilizado um equipamento de raios x de potencial constante modelo FXS-100, fabricado pela Feinfocus, com tamanho focal de 10 μm , tensão máxima de 100 kV e corrente máxima de 1 mA. A Figura 3.18 mostra o equipamento de raios X FXS-100.



Figura 3.18 – Equipamento de raios X microfoco.

Para estes ensaios, foi utilizada, além da placa de fósforo IPX, uma outra placa, modelo IPC2, fabricado pela GEIT. Esta placa possui uma maior sensibilidade que a placa IPX, porém pior resolução. Optou-se por testar essa placa, pois devido à distância grande entre a fonte e o detector e a baixa corrente do equipamento de microfoco, o tempo de exposição tornou-se muito elevado para gerar as imagens com a placa IPX. Foi usado ainda outro equipamento de radiografia computadorizada, modelo CR Tower fabricado pela GEIT. Este equipamento gera imagens com valores de cinza mais elevados em relação ao CR50P, porém devido ao seu maior tamanho de pixel, a definição da imagem pode ser prejudicada.

3.6 – CIRCUITO HIDRÁULICO

Nessa etapa, foram radiografadas juntas coladas de um circuito hidráulico montado para simular o escoamento de água na tubulação, com o objetivo de avaliar a influência da presença de líquidos na detectabilidade de defeitos e na qualidade da imagem. Essa etapa tinha como objetivo ainda simular a temperatura e pressão de operação do sistema para avaliar danos nas juntas devido a estas condições, porém não foi possível completar esta etapa devido a fatores complicadores que impediram a realização da pressurização do circuito.

O circuito é formado por dutos de 4 polegadas de diâmetro contendo juntas coladas, e unidos por flanges. Na etapa de montagem, foram inseridos defeitos no adesivo em algumas das juntas de forma a simular descontinuidades reais encontradas neste tipo de material. Foram obtidas imagens de duas juntas com defeitos simulados de falta de adesão, duas juntas com defeitos simulados de falta de adesivo e duas juntas sem defeito. A figura 3.19 mostra o circuito hidráulico e a Figura 3.20 a ilustração das juntas inspecionadas.



Figura 3.19 – Circuito hidráulico montado para os ensaios.

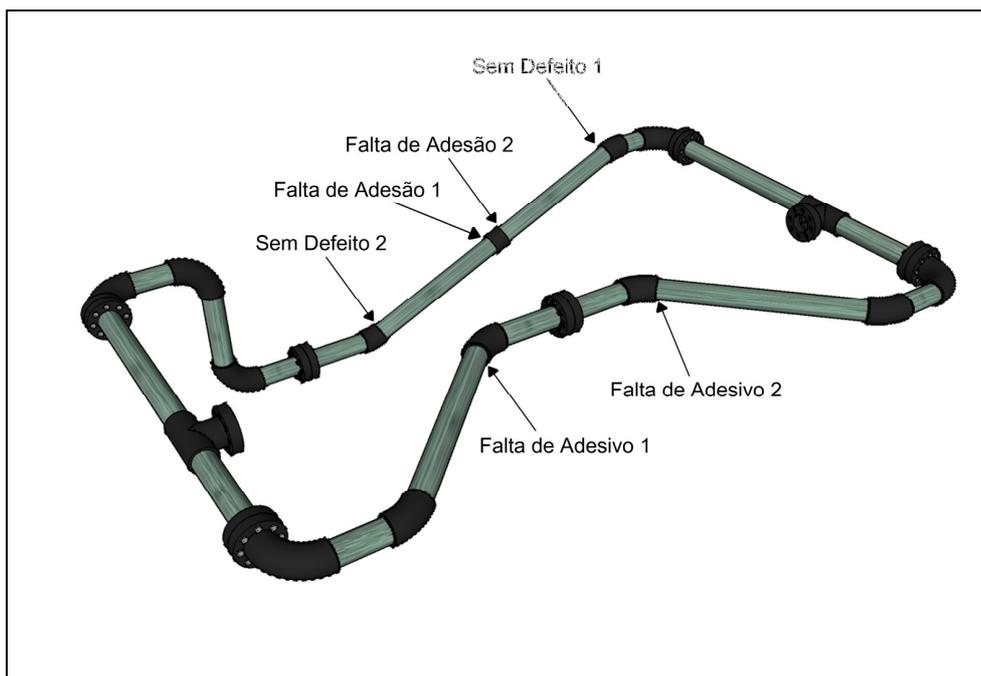


Figura 3.20 – Ilustração do circuito hidráulico com identificação do posicionamento das juntas inspecionadas.

Para estes ensaios foi utilizado um equipamento de raios X de potencial constante modelo MG 165 fabricado pela Yxlon. Este equipamento possui tamanho de foco de 1 mm, tensão máxima de 160 kV e corrente máxima de 22,5 mA. O equipamento de radiografia computadorizada foi o mesmo utilizado nos ensaios anteriores, assim como a placa de fósforo. A figura 3.21 mostra o equipamento de raios X utilizado.



Figura 3.21 – Aparelho de raios X utilizado na inspeção do circuito hidráulico.

Para a execução dos ensaios, foi utilizada a técnica radiográfica de Parede Dupla Vista Simples (PDVS), conforme estabelecido nos ensaios anteriores, obtendo-se quatro radiografias por junta. A figura 3.22 mostra a geometria de exposição.



Figura 3.22 – Geometria de exposição Parede Dupla Vista Simples (PDVS).

Devido a utilização de um novo tubo de raios X, os parâmetros de exposição tiveram que ser ajustados para os ensaios das juntas sem água e conseqüentemente para as juntas radiografadas com a presença de água na tubulação. A tensão foi mantida em 70 kV, a corrente em 3 mA e os tempos de exposição são os mostrados da tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Tempos de Exposição (s) para os ensaios no circuito hidráulico.

	Sem Defeito	Falta de Adesivo	Falta de Adesão
Sem Água	5	5	13
Com Água	30	30	60

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Nesse capítulo, serão apresentados todos os resultados obtidos neste trabalho, segundo a metodologia apresentada no capítulo anterior.

4.1 – CORPOS DE PROVA DE 16 POLEGADAS

4.1.1 – Determinação da Resolução Espacial

Nesta etapa, foram obtidos os valores da resolução espacial básica para as imagens do corpo de prova de 16 polegadas. Para isso, foi utilizado um IQI de fio duplo, de acordo com a norma EN 462-5. Foram testadas três técnicas de exposição, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de exposição utilizados.

Tensão (kV)	Corrente (mA)	Tempo (s)
60	3	284
70	3	120
80	3	60

As Figuras 4.1 a 4.3 mostram a radiografia do IQI de fio duplo para a técnica de PDVS em um tubo de 16 polegadas, utilizando a placa de fósforo HD IP-Plus. Pode ser observado que para as três tensões testadas a Resolução Espacial Básica foi de 100 μm .

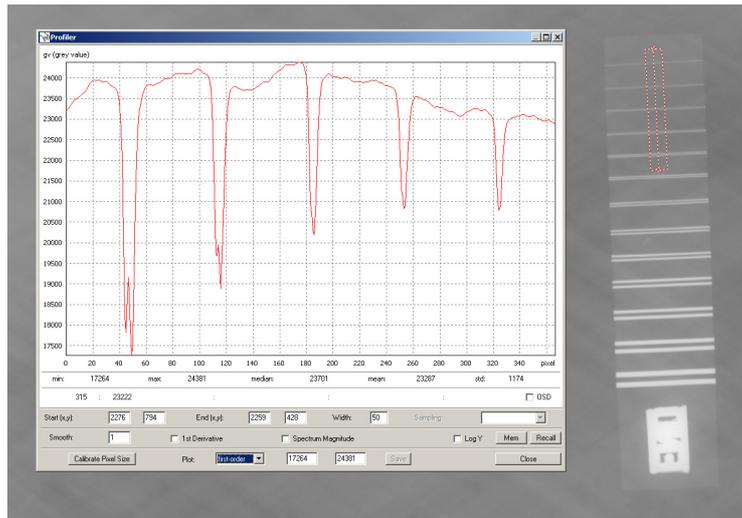


Figura 4.1 – Imagem e perfil do IQI de fio duplo para a tensão de 60 kV.

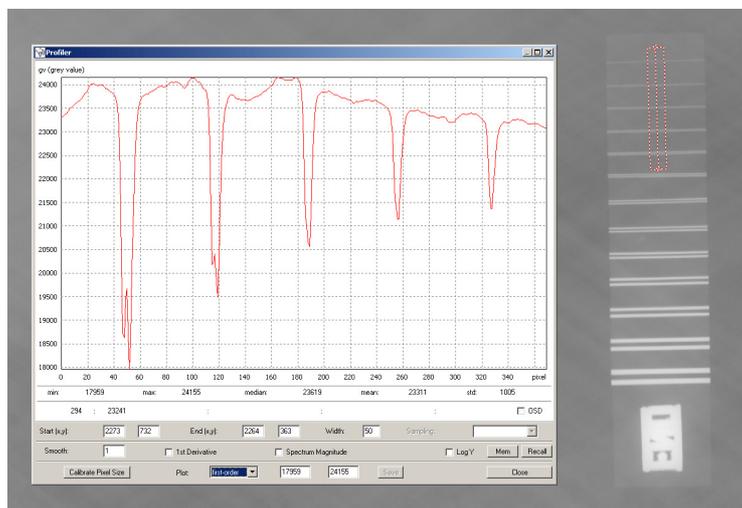


Figura 4.2 – Imagem e perfil do IQI de fio duplo para a tensão de 70 kV.



Figura 4.3 – Imagem e perfil do IQI de fio duplo para a tensão de 80 kV.

4.1.2 – Detecção de Defeitos

Nesta etapa, foram realizadas as radiografias dos corpos de prova com o intuito de detectar os defeitos citados anteriormente. Após a aquisição das imagens, estas foram realçadas através de processamento matemático, com o objetivo de visualizar com maior nitidez as descontinuidades das peças.

As figuras 4.4 a 4.12 mostram as imagens dos corpos de prova. Nestas imagens foi possível observar marcas escuras na região da junta colada, o que representa indicações de vazios. Estas indicações puderam ser detectadas com todas as tensões utilizadas. Assim, pode-se concluir que todos os corpos de prova apresentam regiões com falta de adesivo, inclusive a peça sem defeito.

A Figura 4.4 mostra a radiografia do corpo de prova sem defeito (identificação 1-2) com tensão de 60 kV, sem e com processamento de imagem.

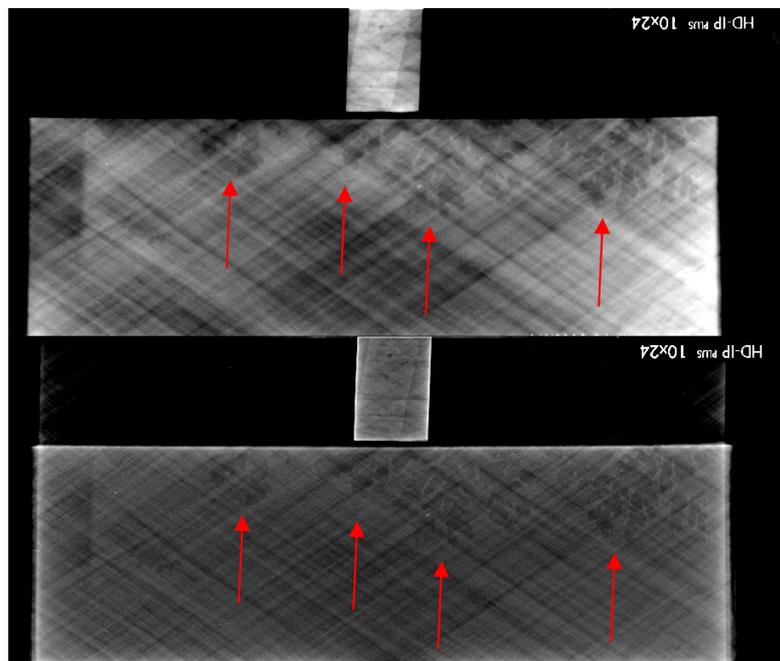


Figura 4.4 – Radiografia do corpo de prova “Sem Defeito 1-2” com tensão de 60 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.5 mostra a radiografia do corpo de prova sem defeito (identificação 1-2) com tensão de 70 kV, sem e com processamento de imagem.

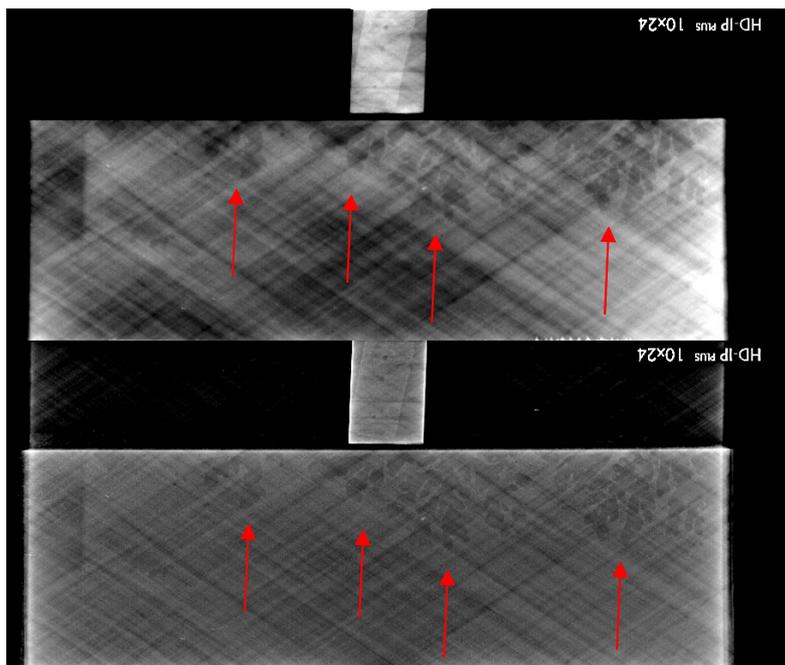


Figura 4.5 – Radiografia do corpo de prova “Sem Defeito 1-2” com tensão de 70 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.6 mostra a radiografia do corpo de prova sem defeito (identificação 1-2) com tensão de 80 kV, sem e com processamento de imagem.

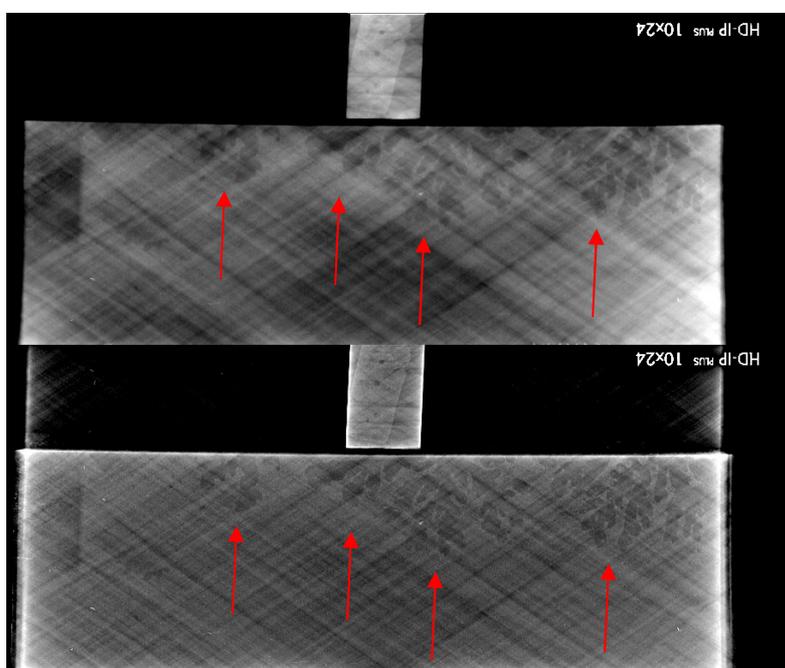


Figura 4.6 – Radiografia do corpo de prova “Sem Defeito 1-2” com tensão de 80 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.7 mostra a radiografia do corpo de prova de falta de adesão (identificação 4-1) com tensão de 60 kV, sem e com processamento de imagem.

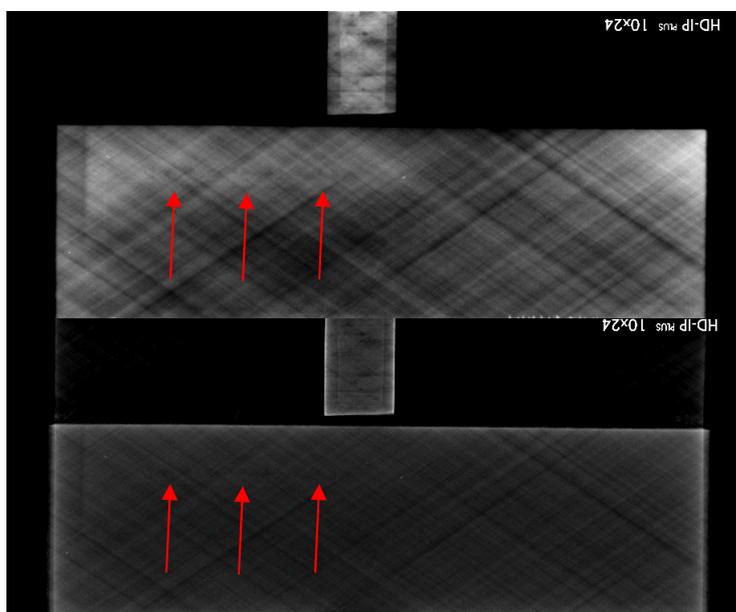


Figura 4.7 – Radiografia do corpo de prova “Falta de Adesão 4-1” com tensão de 60 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.8 mostra a radiografia do corpo de prova de falta de adesão (identificação 4-1) com tensão de 70 kV, sem e com processamento de imagem.

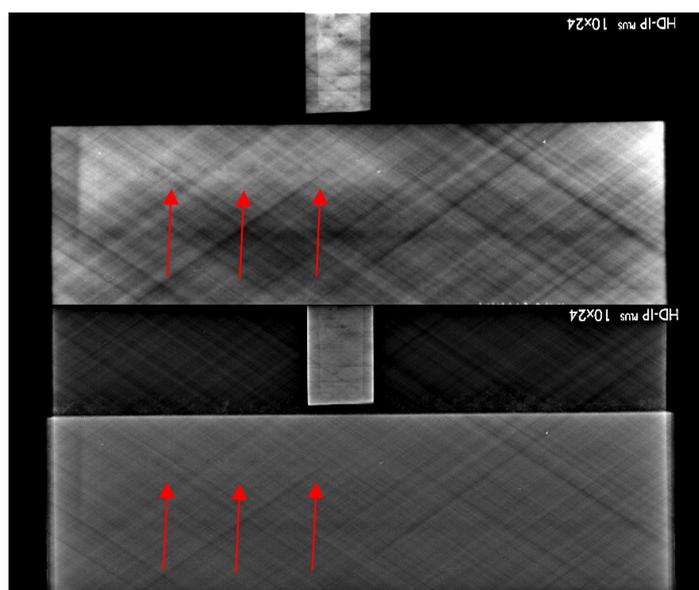


Figura 4.8 – Radiografia do corpo de prova “Falta de Adesão 4-1” com tensão de 70 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.9 mostra a radiografia do corpo de prova de falta de adesão (identificação 4-1) com tensão de 80 kV, sem e com processamento de imagem.

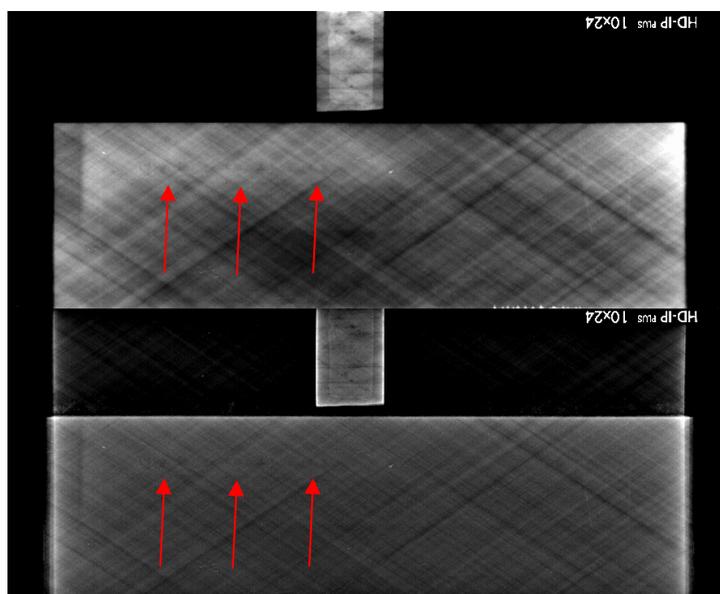


Figura 4.9 – Radiografia do corpo de prova “Falta de Adesão 4-1” com tensão de 80 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.10 mostra a radiografia do corpo de prova com falta de adesivo (identificação 8-1) com tensão de 60 kV, sem e com processamento de imagem.

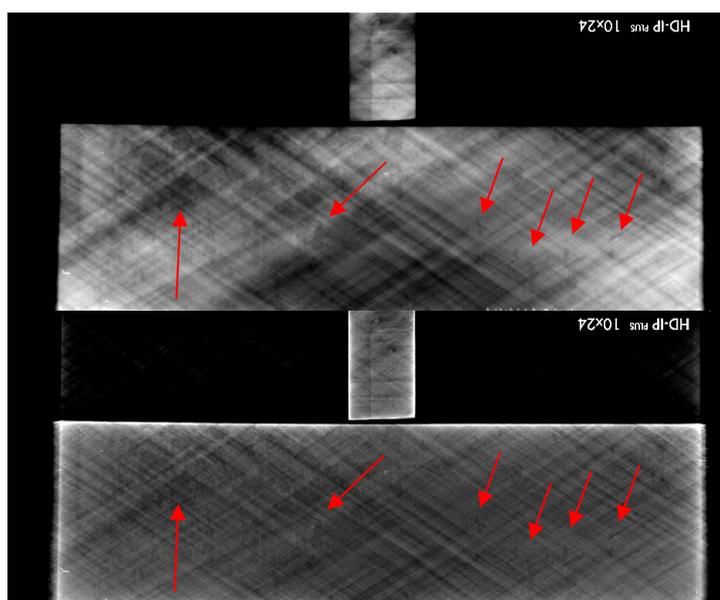


Figura 4.10 – Radiografia do corpo de prova “Falta de Adesivo 8-1” com tensão de 60 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.11 mostra a radiografia do corpo de prova com falta de adesivo (identificação 8-1) com tensão de 70 kV, sem e com processamento de imagem.

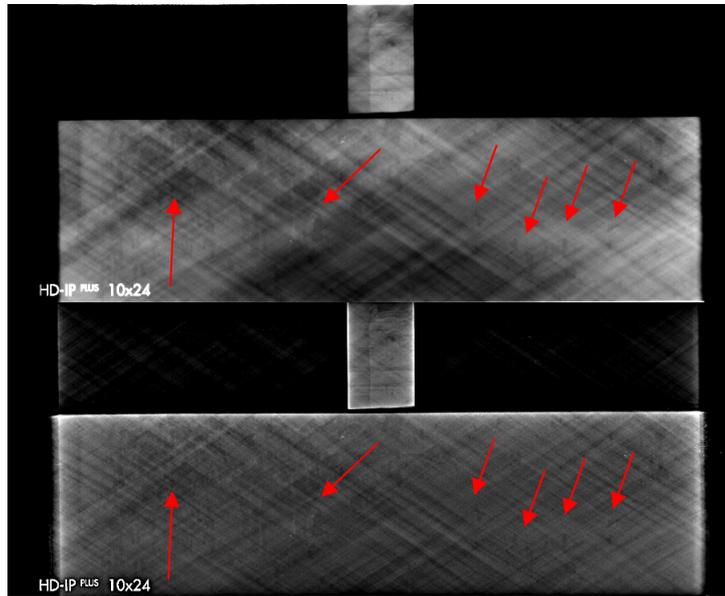


Figura 4.11 – Radiografia do corpo de prova “Falta de Adesivo 8-1” com tensão de 70 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Figura 4.12 mostra a radiografia do corpo de prova com falta de adesivo (identificação 8-1) com tensão de 80 kV, sem e com processamento de imagem.

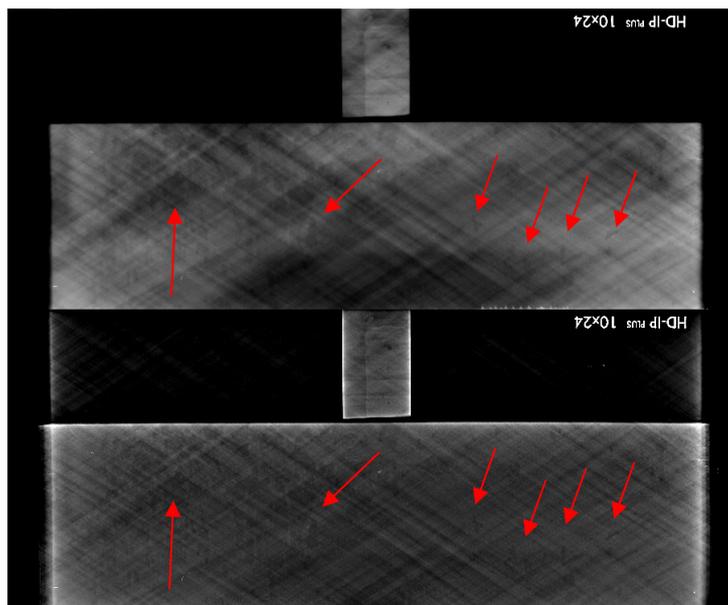


Figura 4.12 – Radiografia do corpo de prova “Falta de Adesivo 8-1” com tensão de 80 kV, sem (superior) e com (inferior).

A Tabela 4.2 mostra os valores de SNR_N médios para as radiografias dos corpos de prova Sem Defeito 1-1, Falta de Adesivo 8-1 e Falta de Adesão 4-1, para as três tensões utilizadas.

Tabela 4.2 – Valores de SNR_N para os corpos de prova radiografados.

Tensão (kV)	Sem Defeito 1-1	Falta de Adesivo 8-1	Falta de Adesão 4-1
60	156	192	195
70	144	172	175
80	140	149	171

Como não existe uma norma específica para Radiografia Computadorizada de materiais compósitos, a SNR_N requerida adotada para os ensaios seguiu as normas para a inspeção de materiais metálicos. A mínima SNR_N requerida por norma é de 60. Assim pode-se constatar que as imagens apresentaram boa SNR_N , já que os valores obtidos foram superiores aos estabelecidos.

Um dos corpos de prova sem defeito (identificação 1-5), após ser radiografado, foi cortado e descolado. Foi retirada uma parte do adesivo e na parte restante, foram inseridos furos passantes de 1,00 mm de diâmetro, com o intuito de verificar a detectabilidade para pequenos vazios no adesivo. Em todas as imagens os furos do padrão de sensibilidade foram detectados, assim como todos os furos inseridos na peça. Porém a área onde o adesivo foi retirado não pode ser claramente observada.

A Figura 4.13 mostra a imagem do corpo de prova “Sem Defeito 1-5” antes e depois de inserir os furos no adesivo, obtida com tensão de 60 kV, sem e com processamento de imagem.

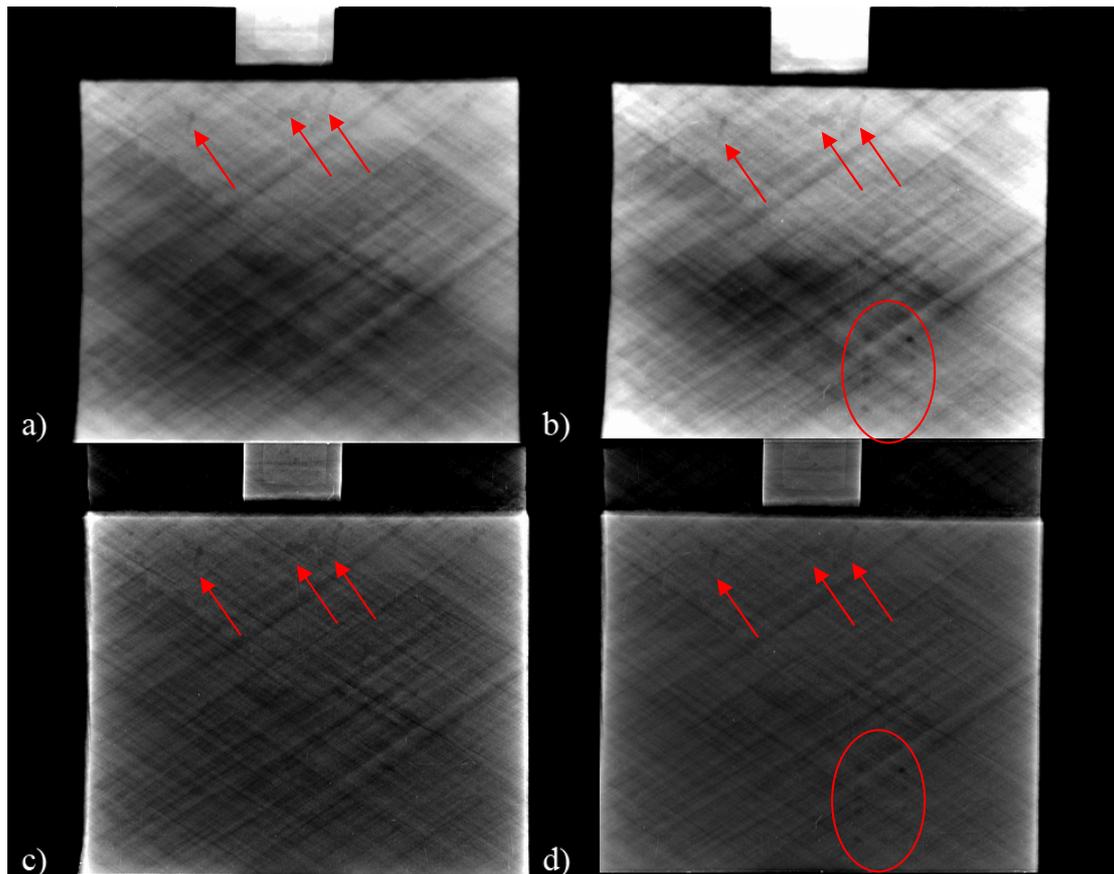


Figura 4.13 – Imagem do corpo de prova “Sem Defeito 1-5” para a tensão de 60 kV –
a) antes da inserção de furos e sem processamento, b) após a inserção de furos sem
processamento, c) antes da inserção de furos e com processamento e d) após a inserção
de furos com processamento.

A Figura 4.14 mostra a imagem do corpo de prova “Sem Defeito 1-5” antes e depois de inserir os furos no adesivo, obtida com tensão de 70 kV, sem e com processamento de imagem.

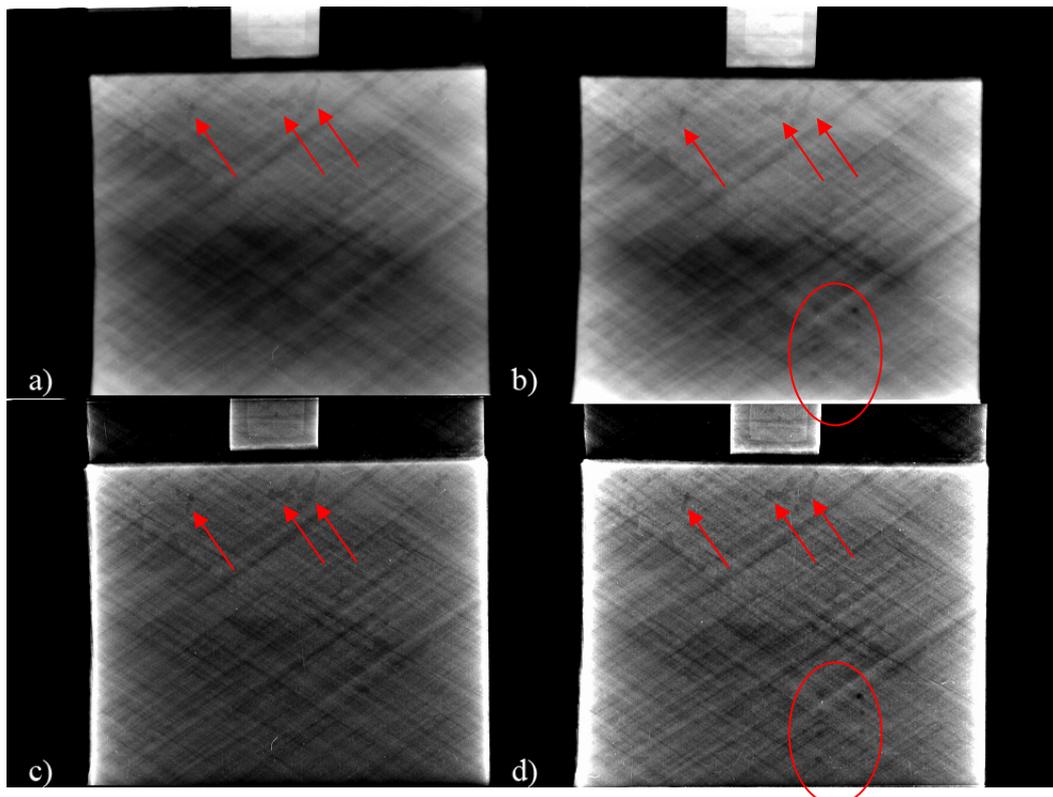


Figura 4.14 – Imagem do corpo de prova “Sem Defeito 1-5” para a tensão de 70 kV –
a) antes da inserção de furos e sem processamento, b) após a inserção de furos sem
processamento, c) antes da inserção de furos e com processamento e d) após a inserção
de furos com processamento.

A Figura 4.15 mostra a imagem do corpo de prova “Sem Defeito 1-5” antes e depois de inserir os furos no adesivo, obtida com tensão de 80 kV, sem e com processamento de imagem.

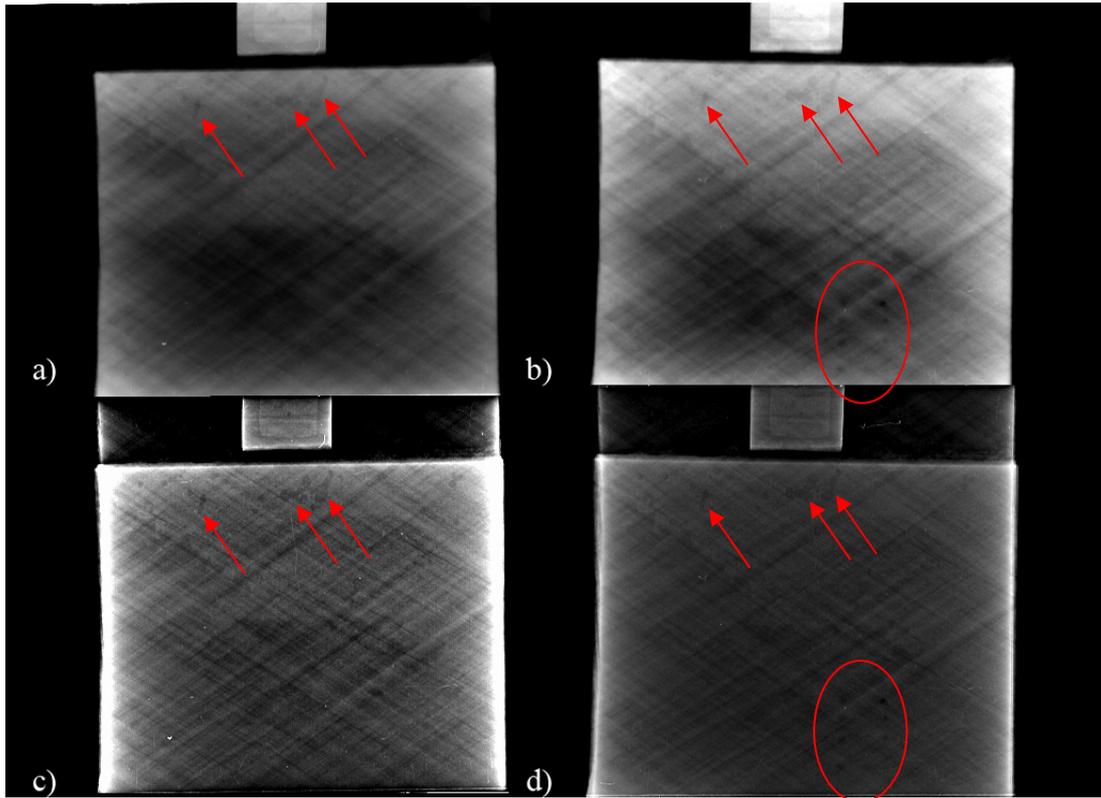


Figura 4.15 – Imagem do corpo de prova “Sem Defeito 1-5” para a tensão de 80 kV – a) antes da inserção de furos e sem processamento, b) após a inserção de furos sem processamento, c) antes da inserção de furos e com processamento e d) após a inserção de furos com processamento.

A Tabela 4.3 mostra os valores de SNR_N médios para as radiografias dos corpos de prova Sem Defeito 1-5, para as três tensões utilizadas.

Tabela 4.3 – Valores de SNR_N para o corpo de prova Sem Defeito 1-5.

Tensão (kV)	Sem Defeito 1-5
60	163
70	157
80	154

Novamente pode-se observar que os valores obtidos para a SNR_N foram superiores aos estabelecidos em norma, tendo as imagens atingido qualidade acima do requerido neste parâmetro.

Com a finalidade de verificar a confiabilidade das imagens obtidas por radiografia computadorizada, estas foram validadas através de comparação com imagens de radiografia convencional. A Figura 4.16 mostra a imagem radiográfica do corpo de prova “Falta de Adesivo 8-1” obtida com radiografia convencional. Para esta imagem, os parâmetros de exposição foram 70 kV, 5 mA e 300 segundos.

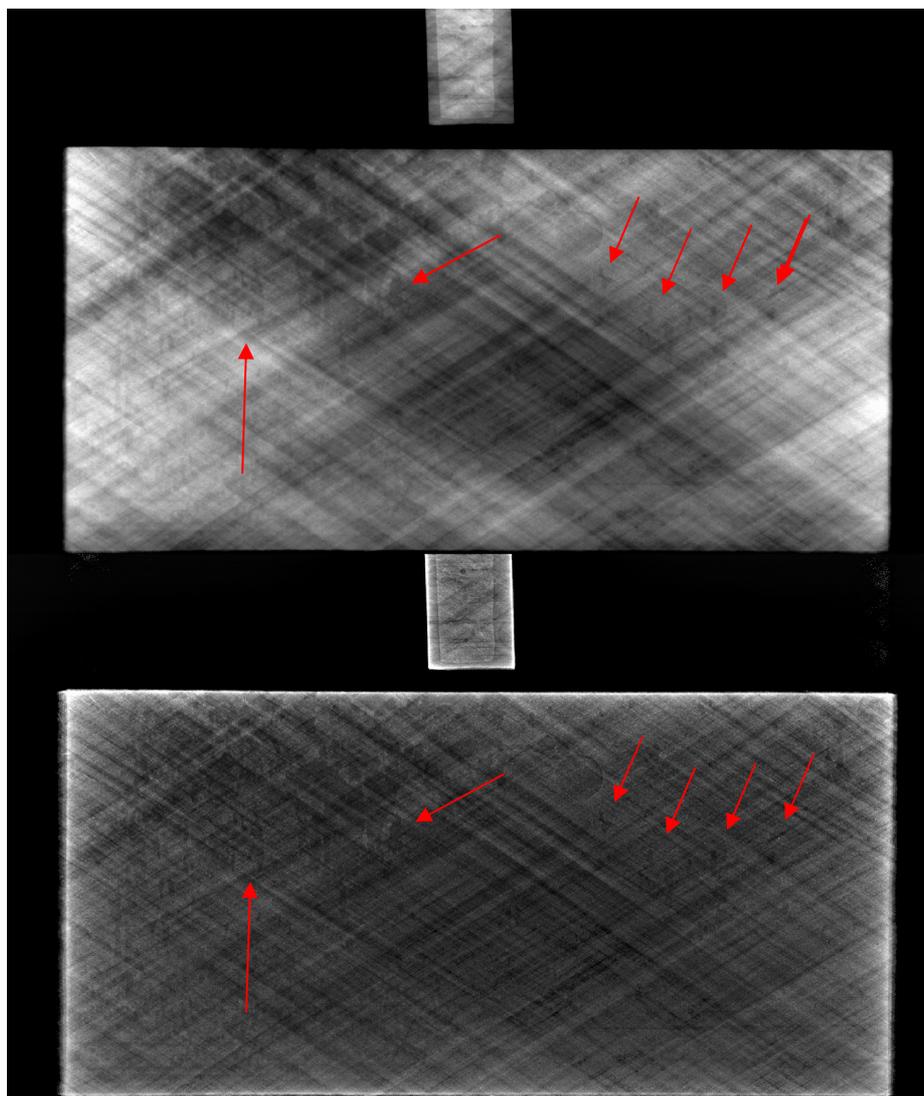


Figura 4.16 – Imagem radiográfica digitalizada do corpo de prova “Falta de Adesivo 8-1” – sem processamento (superior) e com processamento (inferior).

Novamente, os furos passantes do padrão de sensibilidade foram detectados. Pode-se observar marcas escuras na região da junta colada, o que mostra a presença vazios no adesivo, que puderam ser detectadas tanto na radiografia computadorizada, quanto na radiografia convencional. Assim, conclui-se que as imagens mostram

indicações de falta de adesivo que pode ser percebido com todas as técnicas de exposição.

As Figuras 4.17 a 4.24 mostram as imagens da junta colada, sem cortes, nas quatro posições. Nestas imagens pode-se detectar os furos do padrão sensibilidade com as duas técnicas. Além disso, observa-se que as imagens do tubo apresentam marcas escuras na região do adesivo, indicando a presença de regiões de vazio na cola.

A Figura 4.17 mostra a comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 0-1 e a Figura 4.18 mostra a mesma imagem processada com o filtro computacional “Enhance Details”.

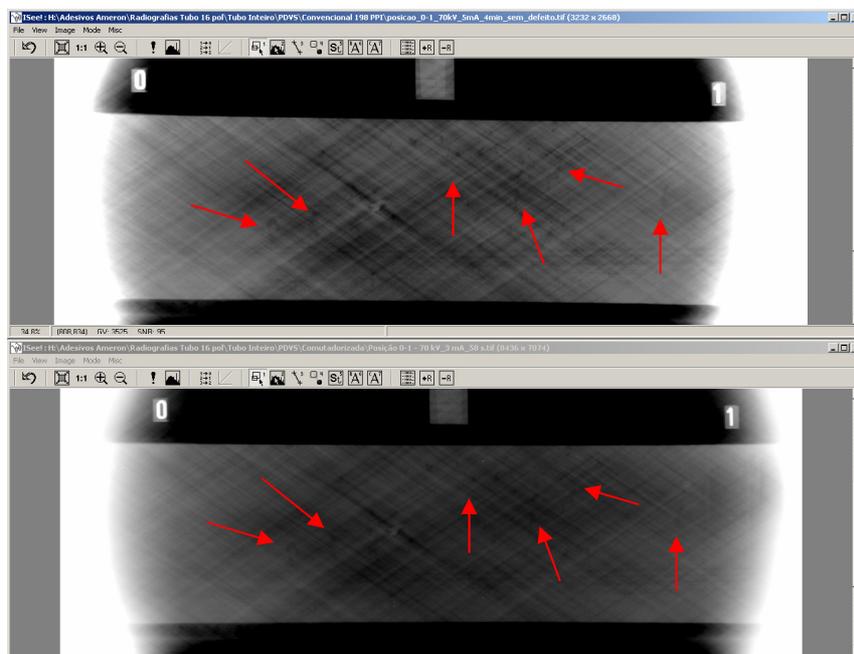


Figura 4.17 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 0-1.

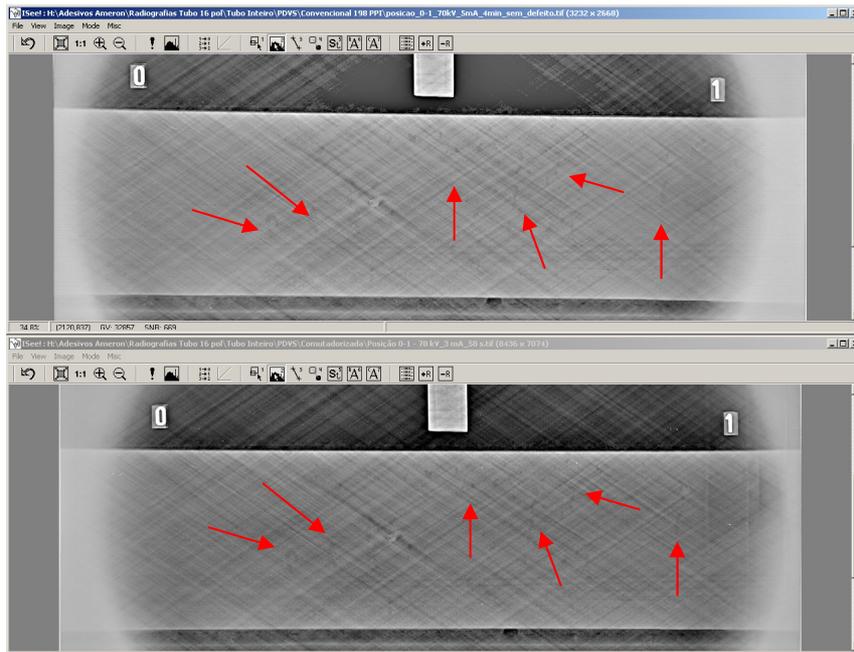


Figura 4.18 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 0-1, processada com filtro “Enhance Details”.

A Figura 4.19 mostra a comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 1-2 e a Figura 4.20 mostra a mesma imagem processada com o filtro computacional “Enhance Details”.

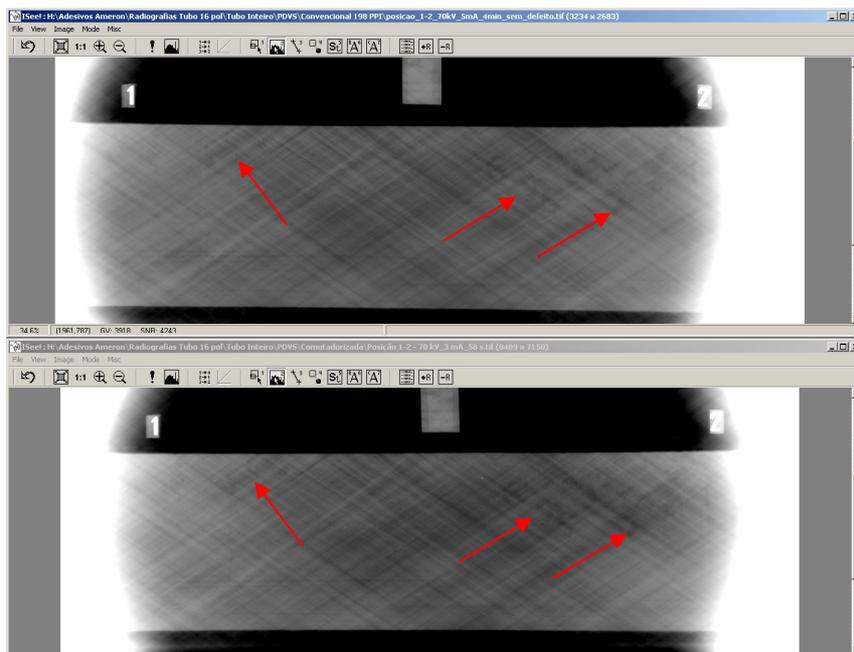


Figura 4.19 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 1-2.

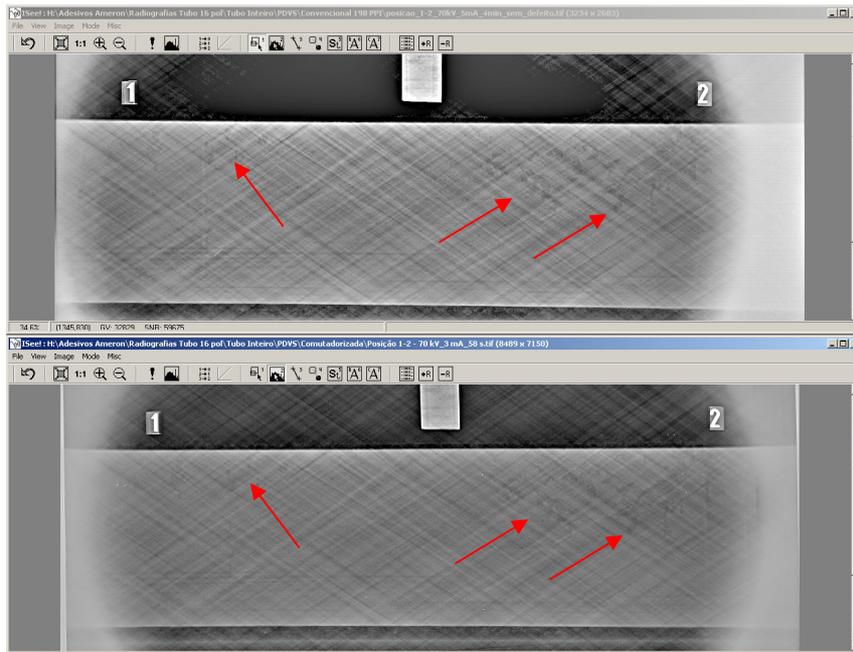


Figura 4.20 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 1-2, processada com filtro “Enhance Details”.

A Figura 4.21 mostra a comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 2-3 e a Figura 4.22 mostra a mesma imagem processada com o filtro computacional “Enhance Details”.

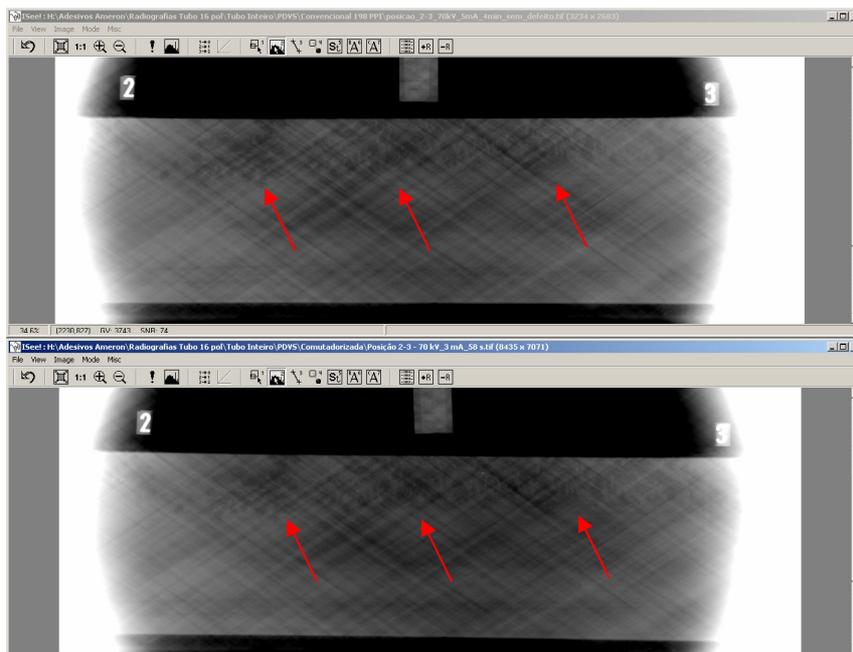


Figura 4.21 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 2-3.

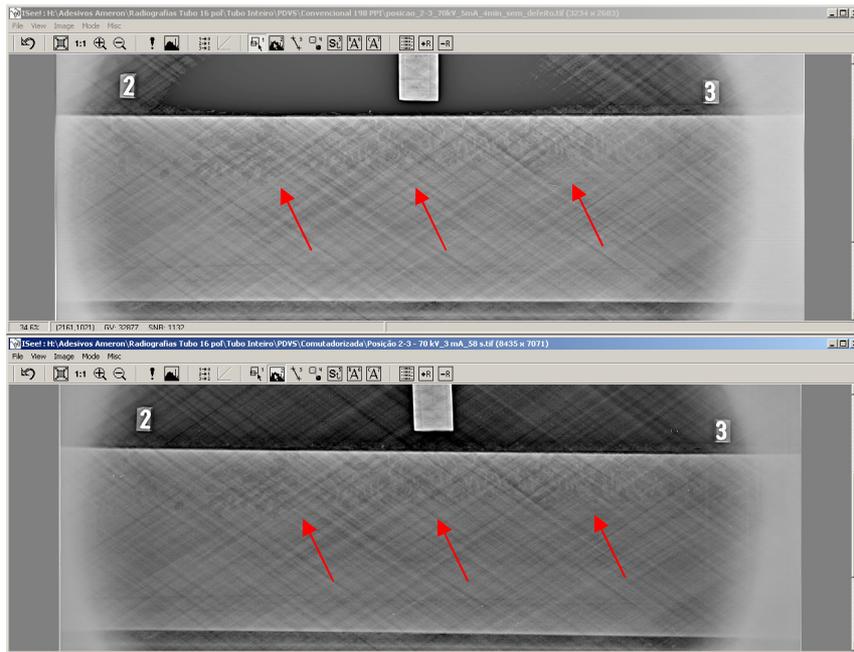


Figura 4.22 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 2-3, processada com filtro “Enhance Details”.

A Figura 4.23 mostra a comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 3-0 e a Figura 4.24 mostra a mesma imagem processada com o filtro computacional “Enhance Details”.

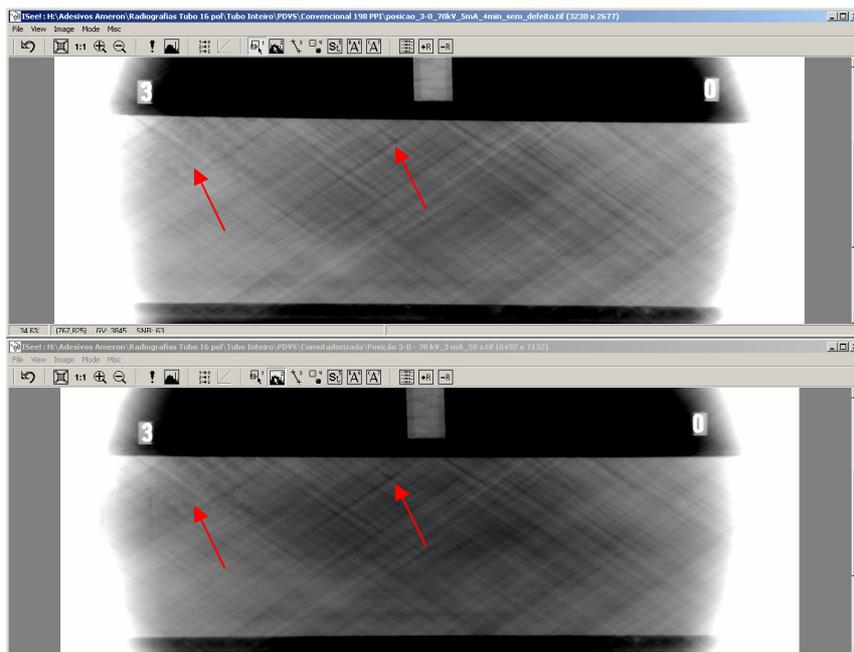


Figura 4.23 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 3-0.

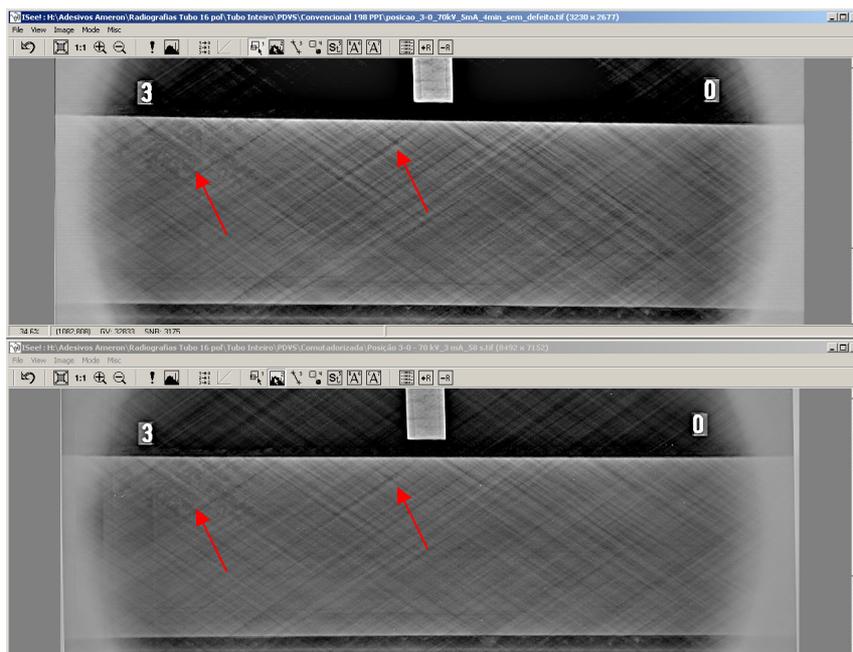


Figura 4.24 – Comparação entre a radiografia convencional e computadorizada para a posição 3-0, processada com filtro “Enhance Details”.

A Tabela 4.4 mostra os valores de SNR_N médios para as radiografias das quatro posições do tubo de 16 polegadas.

Tabela 4.4 – Valores de SNR_N para o tubo de 16 polegadas.

Posição	SNR_N
0-1	134
1-2	132
2-3	134
3-0	136

As imagens atingiram valores de SNR_N acima do requerido pela norma, apresentando assim qualidade satisfatória neste parâmetro de análise.

Em todas as imagens podem-se observar marcas escuras na região da junta colada, o que representa indicações de vazios, pois a ausência de adesivo nestas regiões permite que os fótons de radiação sejam transmitidos com maior intensidade nesses pontos que nos pontos onde há a presença uniforme da cola. No corpo de prova que foi descolado e inserido furos, todos os defeitos puderam ser detectados, como forma de

pontos escuros na imagem, na região do adesivo.

Pode-se observar através destas análises que mesmo os corpos de prova confeccionados para não conter defeitos apresentaram indicações de vazios. Essas indicações são semelhantes às encontradas nos corpos de prova com falta de adesivo, assim como aos defeitos inseridos após a peça ser descolada.

4.2 – CORPOS DE PROVA DE 4 POLEGADAS

4.2.1 – Determinação da Resolução Espacial

Nesta etapa, foram obtidos os valores da resolução espacial básica para as imagens do corpo de prova de 4 polegadas. Para isso, foi utilizado um IQI de fio duplo, de acordo com a norma EN 462-5. Foram testadas três técnicas de exposição, conforme mostra a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Parâmetros de exposição utilizados.

Tensão (kV)	Corrente (mA)	Tempo (s)
60	3	30
70	3	12
80	3	6

As Figuras 4.25 a 4.27 mostram a radiografia do IQI de fio duplo para a técnica de PDVS em um tubo de 4 polegadas, utilizando a placa de fósforo HD IP-Plus. Pode ser observado que para as três tensões testadas a Resolução Espacial Básica foi de 100 μm .

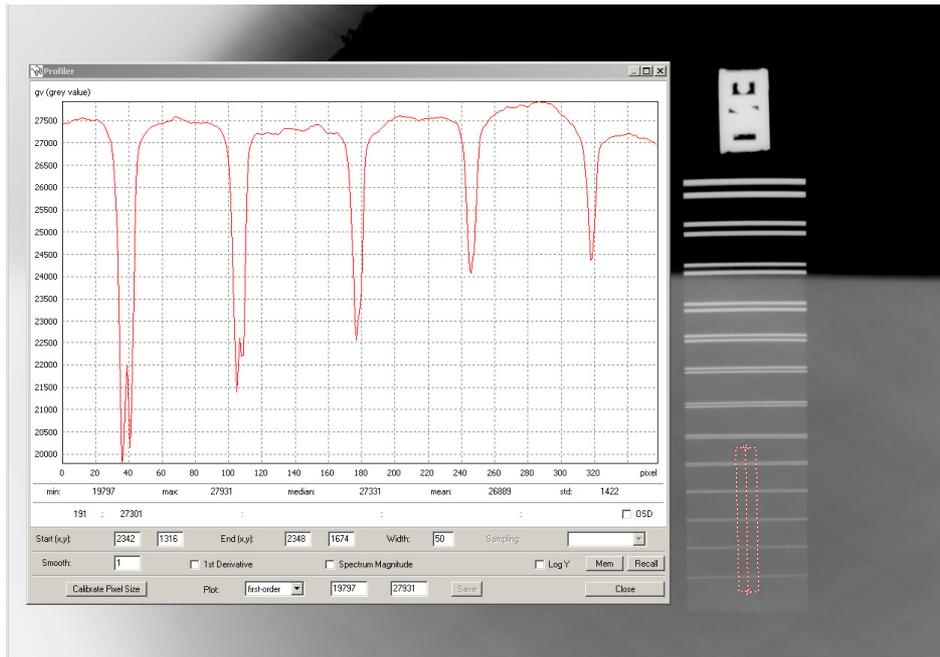


Figura 4.25 – Imagem e perfil do IQI de fio duplo para a tensão de 60 kV.

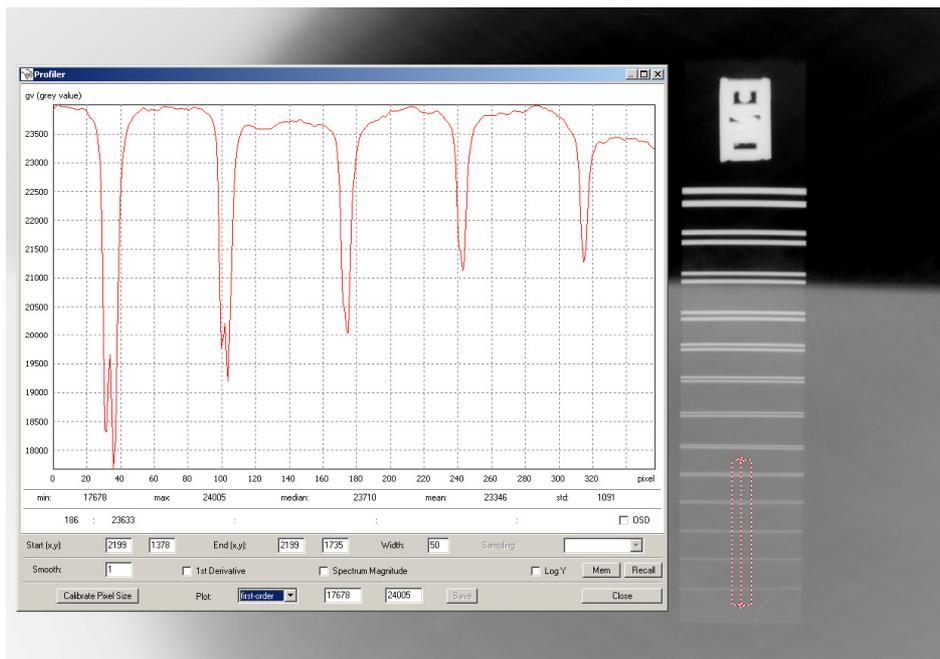


Figura 4.26 – Imagem e perfil do IQI de fio duplo para a tensão de 70 kV.



Figura 4.27 – Imagem e perfil do IQI de fio duplo para a tensão de 80 kV.

4.2.2 – Ensaios de Detecção de Defeitos

Nesta etapa, primeiramente foram obtidas imagens de um corpo de prova sem adesivo e de outro idêntico com adesivo. O intuito deste ensaio foi verificar quantitativamente a influência da presença ou não do adesivo no nível de cinza da imagem radiográfica. Para isso, marcou-se nas imagens regiões de interesse (ROIs) para obter os valores de intensidade nestas áreas. Posteriormente, foram realizadas as radiografias do corpo de prova com falta de adesivo em forma de faixas verticais e horizontais, com o intuito de detectar os esses defeitos. Após a aquisição das imagens, estas foram realçadas através de processamento matemático, com o objetivo de visualizar com maior nitidez as descontinuidades das peças.

As Figuras 4.28 a 4.30 mostram a comparação entre um corpo de prova sem e outro com adesivo para as tensões de 60 kV, 70 kV e 80 kV.

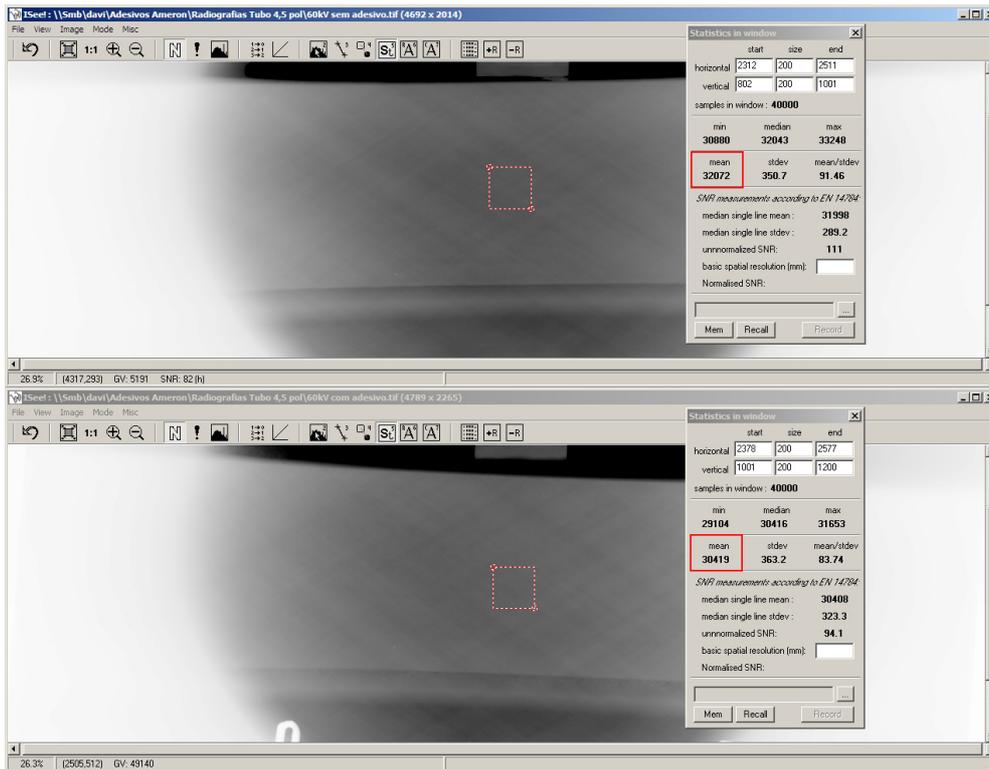


Figura 4.28 – Comparação dos corpos de prova sem e com adesivo para tensão de 60 kV.

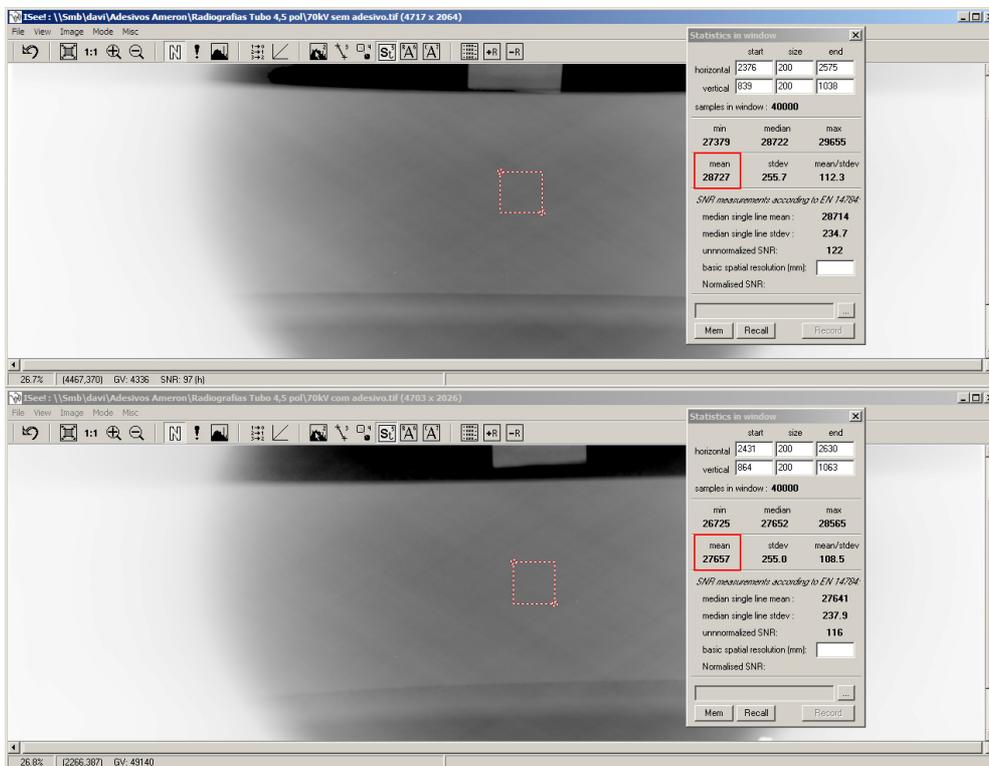


Figura 4.29 – Comparação dos corpos de prova sem e com adesivo para tensão de 70 kV.

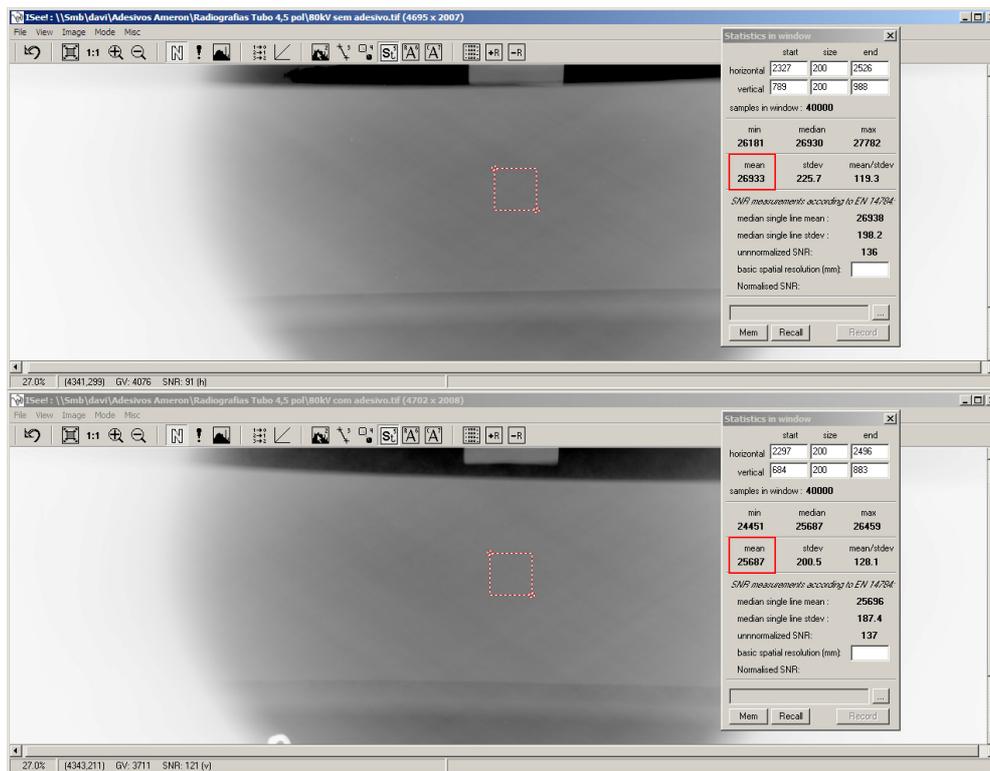


Figura 4.30 – Comparação dos corpos de prova sem e com adesivo para tensão de 80 kV.

Nas imagens pode-se observar que há diferença nos valores de cinza, sendo a intensidade de radiação registrada pela placa de fósforo maior para o corpo de prova sem adesivo. Pode-se concluir então que a falta de adesivo pode ser detectada quantitativamente.

A Figura 4.31 mostra a radiografia do corpo de prova com falta de adesivo horizontal com tensão de (a) 60 kV, (b) 70 kV e (c) 80 kV. A Figura 4.32 mostra as mesmas imagens processadas com filtro computacional “Enhance Details”.

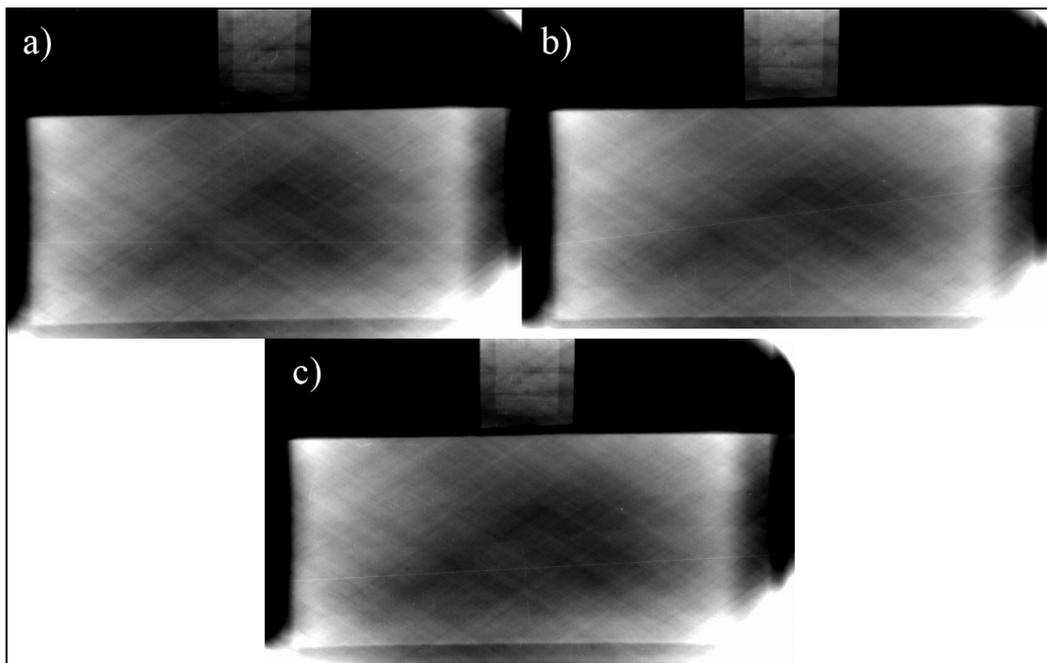


Figura 4.31 – Imagem do corpo de prova com falta de adesivo horizontal com tensão de (a) 60 kV, (b) 70 kV e (c) 80 kV.

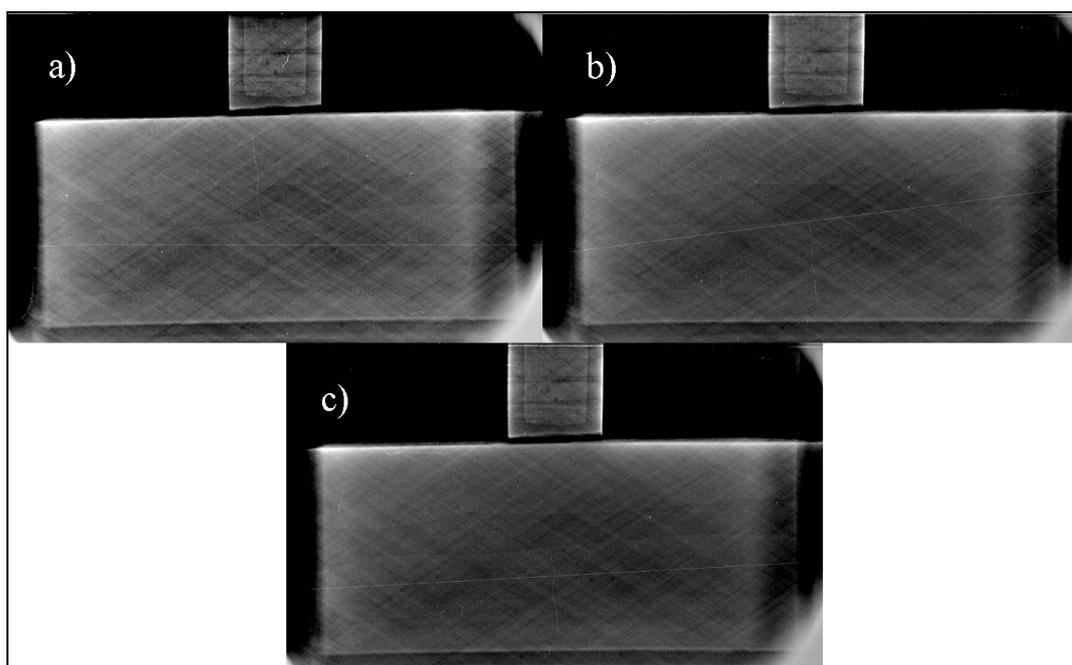


Figura 4.32 – Imagem do corpo de prova com falta de adesivo horizontal com tensão de (a) 60 kV, (b) 70 kV e (c) 80 kV, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”.

A Figura 4.33 mostra a radiografia do corpo de prova com falta de adesivo vertical com tensão de (a) 60 kV, (b) 70 kV e (c) 80 kV. A Figura 4.34 mostra as

mesmas imagens processadas com filtro computacional “Enhance Details”.

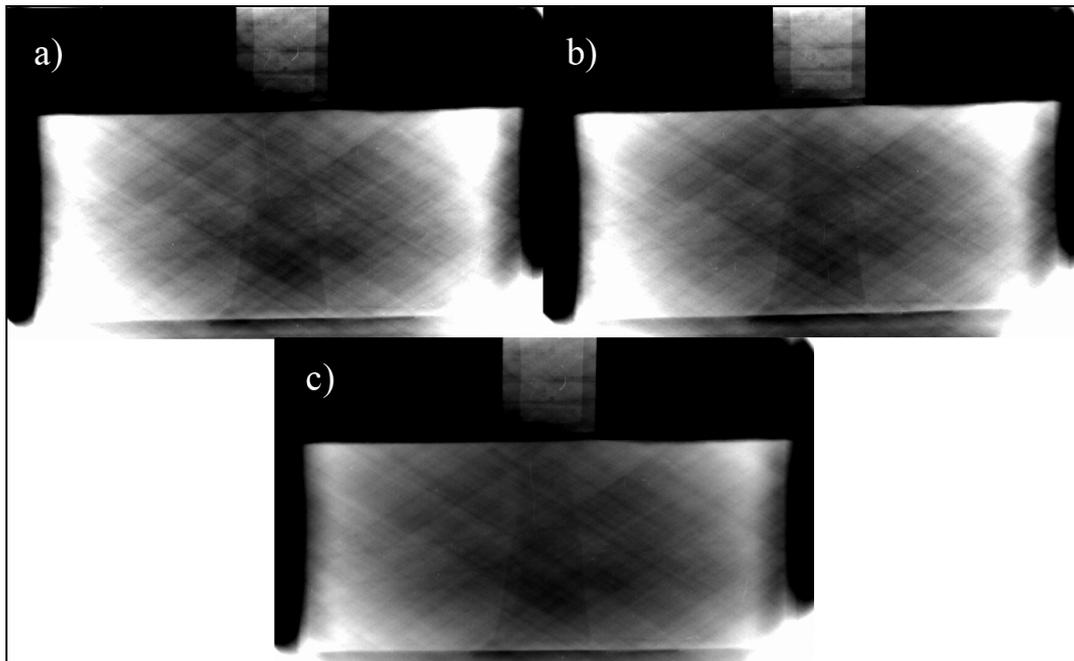


Figura 4.33 – Imagem do corpo de prova com falta de adesivo vertical com tensão de (a) 60 kV, (b) 70 kV e (c) 80 kV.

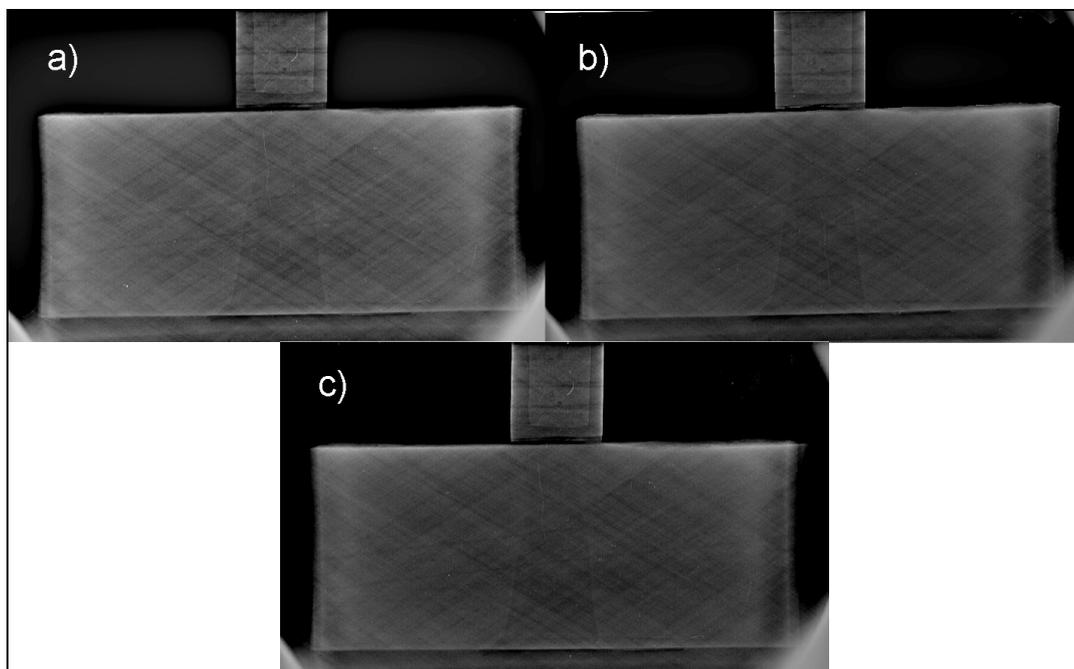


Figura 4.34 – Imagem do corpo de prova com falta de adesivo horizontal com tensão de (a) 60 kV, (b) 70 kV e (c) 80 kV, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”.

Nas imagens obtidas pode-se observar que os furos do padrão de sensibilidade foram detectados para todas as tensões, assim como os defeitos de falta de adesivo. As imagens mostraram que o contraste entre as partes com e sem adesivo foi bastante acentuada, permitindo a total visualização da região vazia, inclusive com a delimitação das bordas dos defeitos.

A Tabela 4.6 mostra os valores de SNR_N médios para as radiografias do corpo de prova com falta de adesivo horizontal e vertical, para as três tensões utilizadas.

Tabela 4.6 – Valores de SNR_N para o corpo de prova de falta de adesivo.

Tensão (kV)	Horizontal	Vertical
60	207	198
70	203	183
80	198	182

4.3 – TESTES COM CONTRASTE

Nesta etapa, foram obtidas imagens do corpo de prova de 4 polegadas, cortado, para a avaliação da influência dos agentes de contraste na detectabilidade de vazios na região do adesivo, para as três tensões, sem e com processamento de imagem.

Pode-se observar em todas as imagens que a adição de agentes de contraste no adesivo realçou as indicações de vazios na cola, podendo ser um método de grande utilidade na detecção de defeitos na colagem. Os resultados dessa etapa mostraram que o melhor contraste obtido foi quando utilizado o elemento bário na mistura da cola, como era de se esperar devido ao seu maior número atômico.

A Figura 4.35 mostra a radiografia dos corpos de prova com tensão de 60 kV. A Figura 4.36 mostra a mesma imagem processada com o filtro computacional “Enhance Details”.

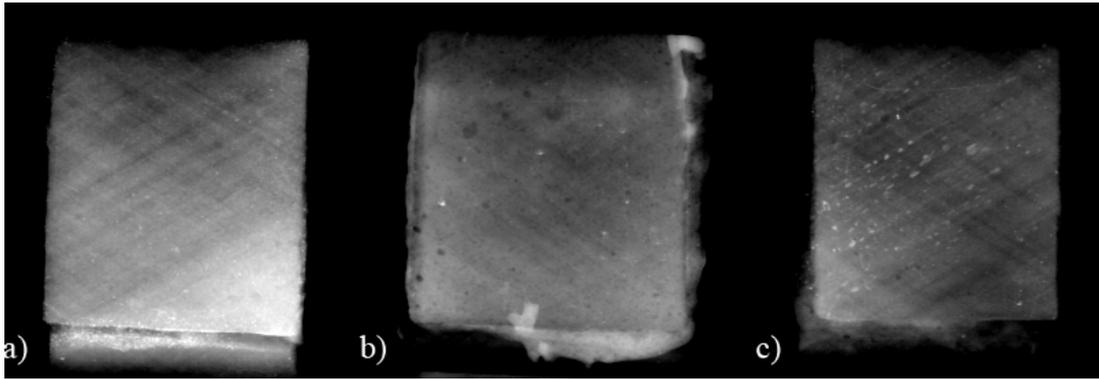


Figura 4.35 – Radiografia dos corpos de prova de 4 polegadas com tensão de 60 kV. (a) somente adesivo, (b) mistura de adesivo e bário e (c) mistura de adesivo e iodo.

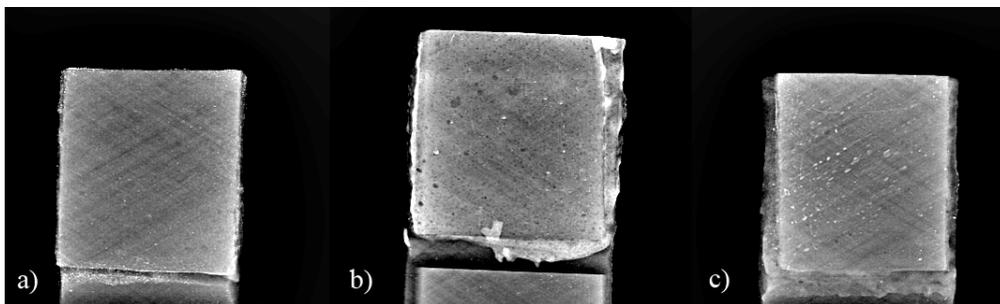


Figura 4.36 – Radiografia dos corpos de prova de 4 polegadas com tensão de 60 kV processada com o filtro “Enhance Details”. (a) somente adesivo, (b) mistura de adesivo e bário e (c) mistura de adesivo e iodo.

A Figura 4.37 mostra a radiografia dos corpos de prova com tensão de 70 kV. A Figura 4.38 mostra a mesma imagem processada com o filtro computacional “Enhance Details”.

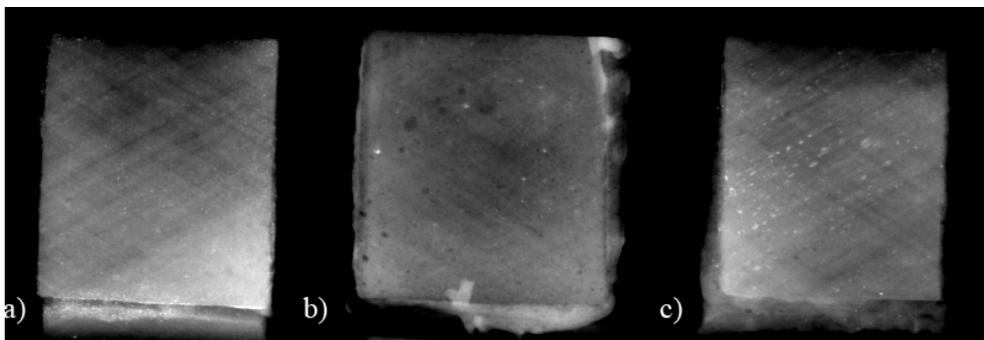


Figura 4.37 – Radiografia dos corpos de prova de 4 polegadas com tensão de 70 kV. (a) somente adesivo, (b) mistura de adesivo e bário e (c) mistura de adesivo e iodo.

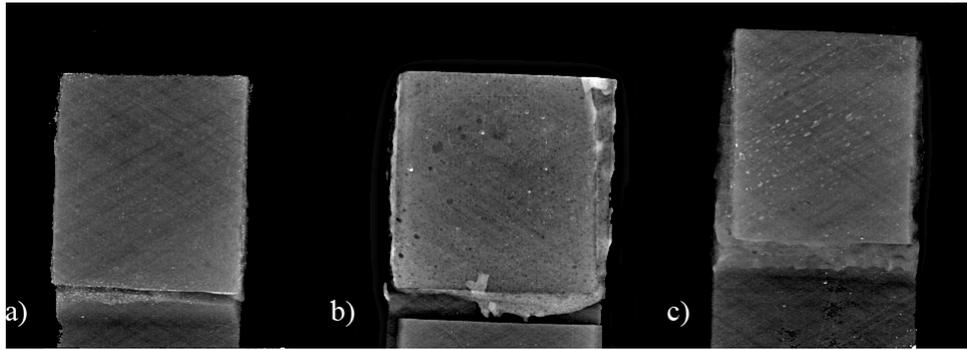


Figura 4.38 – Radiografia dos corpos de prova de 4 polegadas com tensão de 70 kV processada com o filtro “Enhance Details”. (a) somente adesivo, (b) mistura de adesivo e bário e (c) mistura de adesivo e iodo.

A Figura 4.39 mostra a radiografia dos corpos de prova com tensão de 80 kV. A Figura 4.40 mostra a mesma imagem processada com o filtro computacional “Enhance Details”.

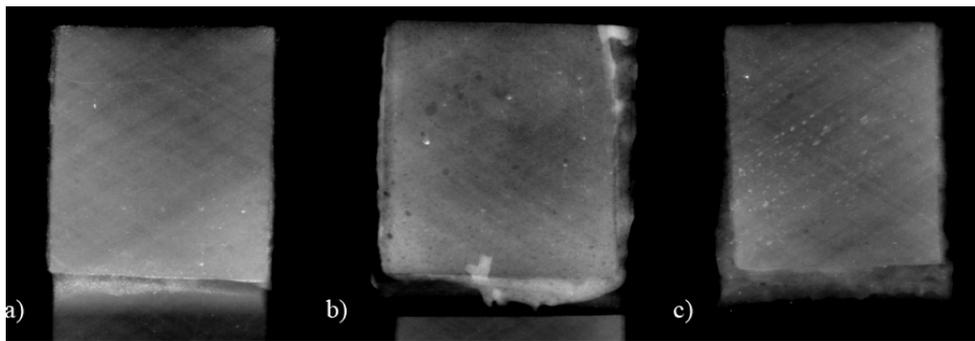


Figura 4.39 – Radiografia dos corpos de prova de 4 polegadas com tensão de 80 kV. (a) somente adesivo, (b) mistura de adesivo e bário e (c) mistura de adesivo e iodo.

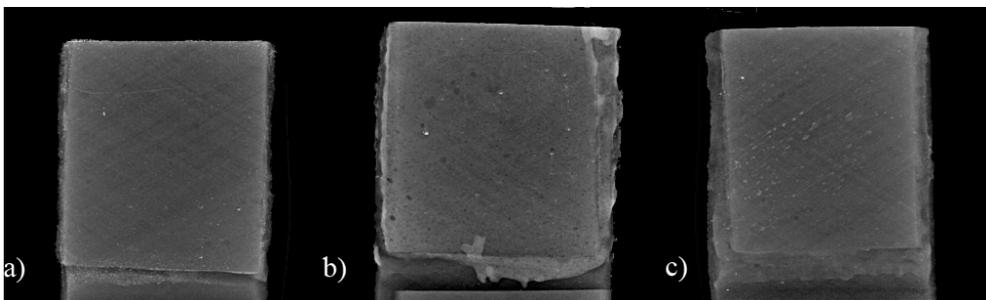


Figura 4.40 – Radiografia dos corpos de prova de 4 polegadas com tensão de 80 kV processada com o filtro “Enhance Details”. (a) somente adesivo, (b) mistura de adesivo e bário e (c) mistura de adesivo e iodo.

Apesar desta técnica ter apresentado bons resultados, sua utilização merece um estudo devido a dificuldade de inserir os elementos no adesivo. Como existe um procedimento para a preparação do adesivo, a adição de elementos de contraste implica em estudos para verificar sua influência no processo de cura, o que pode resultar em problemas na resistência e nas propriedades de adesão da cola. As dificuldades de aplicação do contraste são maiores para juntas em funcionamento ou após a montagem, pois o adesivo após a cura total torna-se bastante resistente, o que impediria a inclusão dos elementos de contraste na junta.

4.4 – ENSAIOS COM MAGNIFICAÇÃO

Nesta etapa foram obtidas imagens dos corpos de prova, sem e com magnificação, para avaliar a influência desta técnica na detecção de descontinuidades na junta colada.

A Figura 4.41 mostra a radiografia do padrão de sensibilidade sem magnificação (cima) e com magnificação (baixo). Para o ensaio sem magnificação, a distância fonte detector foi de 1300 mm e para o ensaio com magnificação a distância fonte detector foi de 1500 mm, com distância fonte objeto foi de 400 mm, gerando um fator de ampliação de 3,75 vezes. Em ambos os ensaios, o image plate utilizado foi o IPX, fabricado pela GEIT e o scanner foi o CR50P, também fabricado pela GEIT.

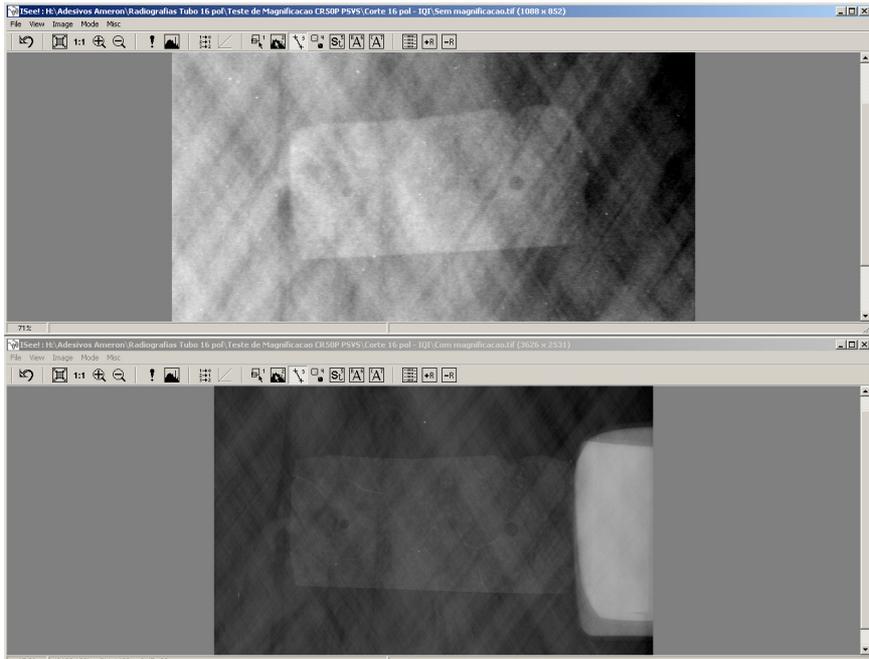


Figura 4.41 – Radiografia do padrão de sensibilidade sem e com magnificação.

As Figuras 4.42 e 4.43 mostram os perfis de linha dos furos do padrão de sensibilidade das radiografias sem e com magnificação, respectivamente.

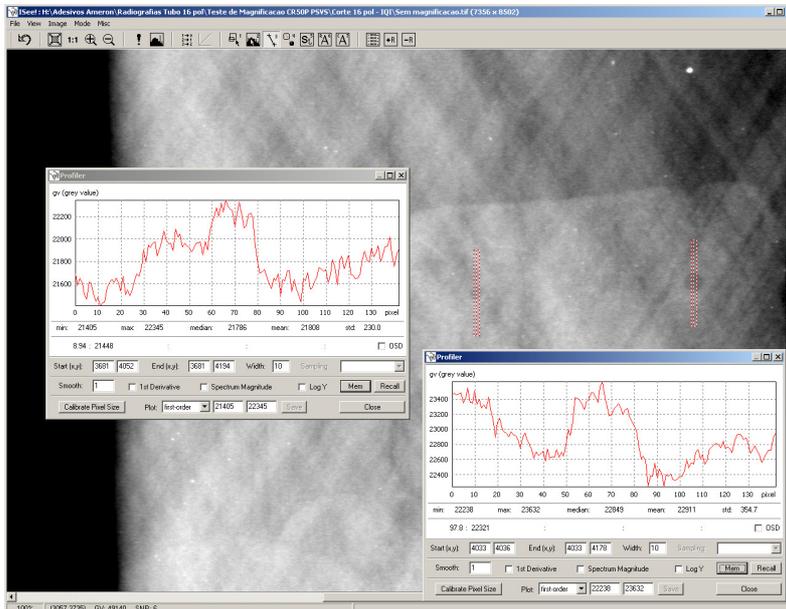


Figura 4.42 – Perfis de linha dos furos do padrão de sensibilidade para imagem sem magnificação.

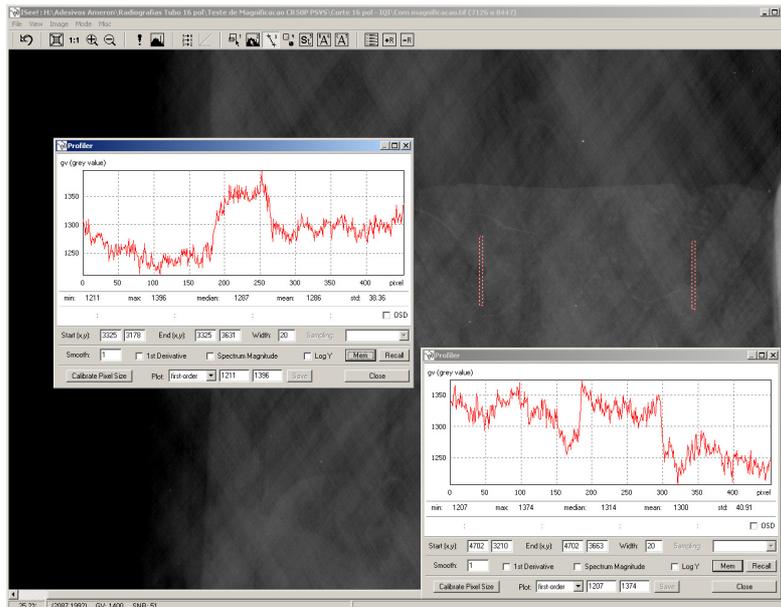


Figura 4.43 – Perfis de linha dos furos do padrão de sensibilidade para imagem com magnificação.

Através da análise dos perfis de linha do padrão de sensibilidade pode-se observar que há aumento do contraste entre as partes com e sem adesivo, (expresso pela diferença entre essas regiões), quando é utilizada a técnica de magnificação, mostrando que as regiões de falta de adesivo terão o contraste amplificado usando essa técnica.

A Figura 4.44 mostra a radiografia de um corpo de prova de 4 polegadas sem e com magnificação. Para o ensaio sem magnificação, a distância fonte detector foi de 1300 mm e para o ensaio com magnificação a distância fonte detector foi de 2000 mm, com distância fonte objeto de 400 mm, gerando um fator de ampliação de 5 vezes.

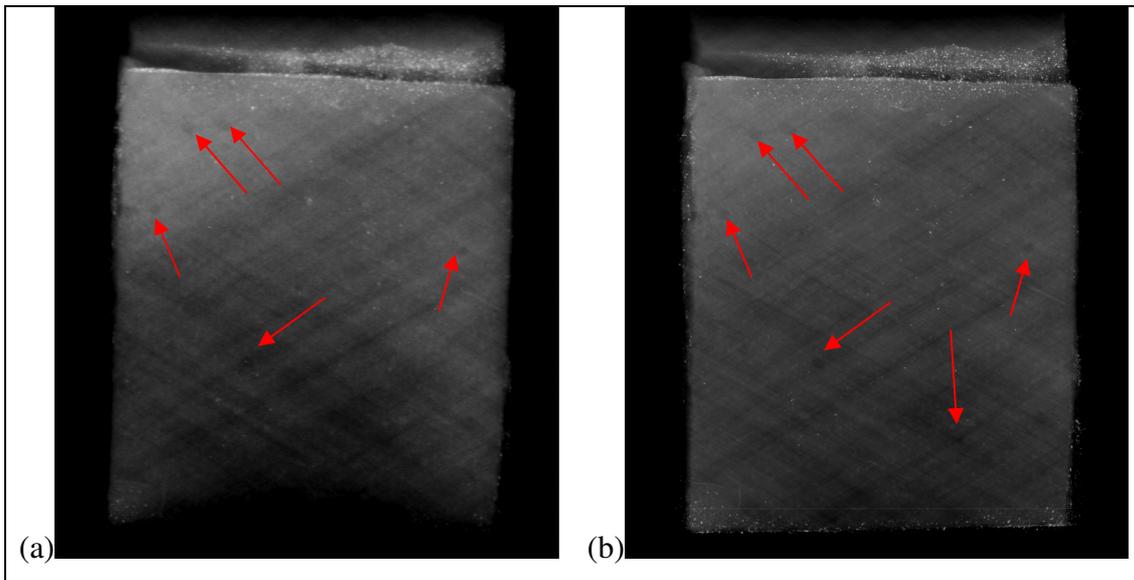


Figura 4.44 – Radiografia do corpo de prova de 4 polegadas (a) sem magnificação e (b) com magnificação.

As Figuras 4.45 a 4.47 mostram radiografias de cortes de tubos de 16 polegadas sem e com magnificação, utilizando a técnica de PSVS. Para o ensaio sem magnificação, a distância fonte detector foi de 1300 mm e para o ensaio com magnificação a distância fonte detector foi de 2000 mm, com distância fonte objeto foi de 1000 mm, gerando um fator de ampliação de 2 vezes. Em ambos os ensaios, o image plate utilizado foi o IPC2, fabricado pela GEIT e o scanner foi o CR Tower, também fabricado pela GEIT.

Os resultados mostraram que há um grande realce das bordas dos defeitos devido à magnificação, permitindo a visualização de pequenas indicações de vazios sem desfocagem da imagem. Isso se deve ao aumento da resolução espacial, pois a imagem será distribuída em uma área maior do detector, gerando uma maior quantidade de pixels por milímetro.

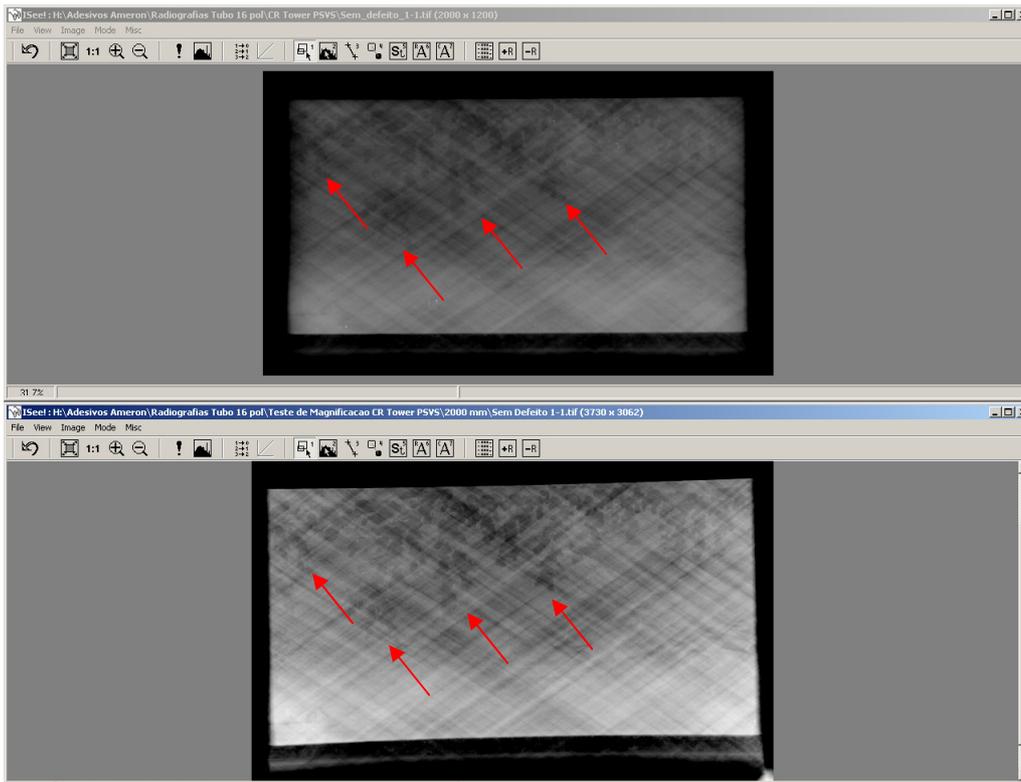


Figura 4.45 – Comparação entre as radiografias sem e com magnificação do corpo de prova “Sem Defeito 1-1”.

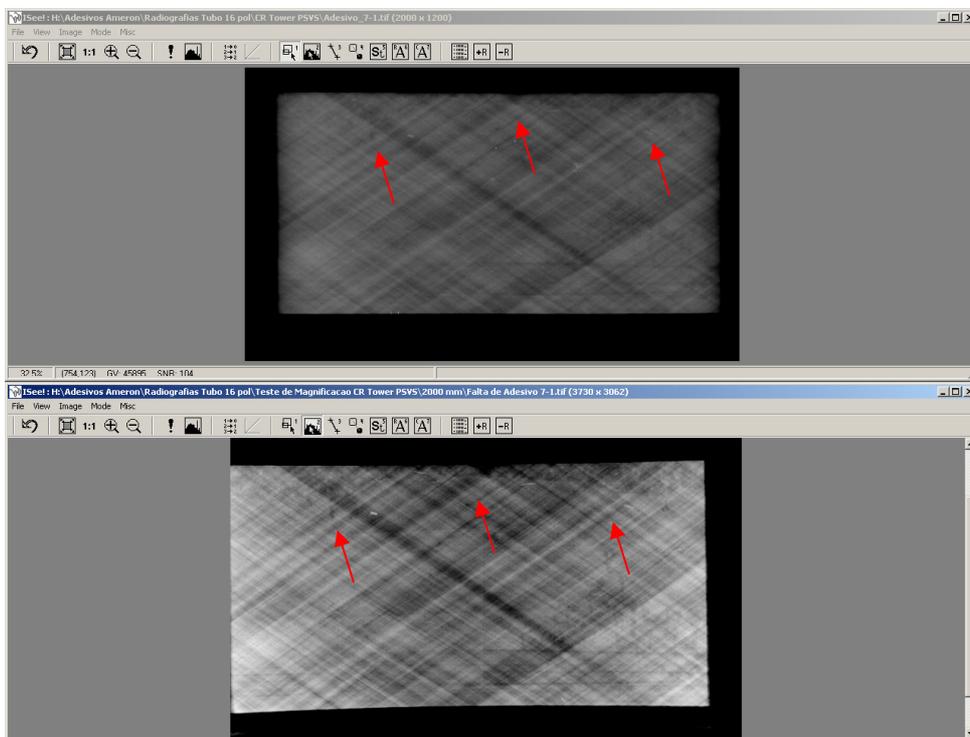


Figura 4.46 – Comparação entre as radiografias sem e com magnificação do corpo de prova “Falta de Adesivo 7-1”.

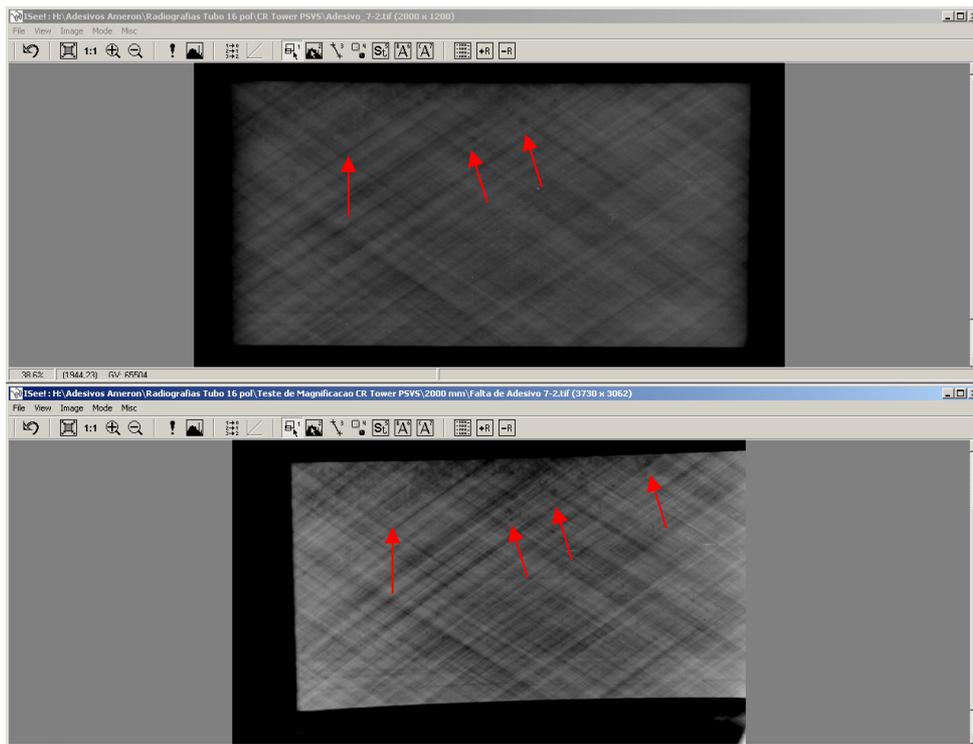


Figura 4.47 – Comparação entre as radiografias sem e com magnificação do corpo de prova “Falta de Adesivo 7-2”.

A técnica apresentou melhor visualização dos defeitos devido ao maior realce das bordas provocado pela ampliação, como dito anteriormente, mesmo utilizando placas de fósforo de resolução padrão, como o IPC2 e um sistema de radiografia computadorizada com tamanho de pixel grande, como o CR Tower. Porém o tempo de exposição foi bastante elevado, devido à baixa intensidade da fonte de raios X microfocada disponível.

Uma das dificuldades da utilização desta técnica é obter uma fonte de raios X com tamanho focal que permita ampliar a imagem, sem distorção das bordas, com alta intensidade, que permita a utilização em peças com maiores espessuras que as testadas nesse trabalho, pois terão que ser radiografadas as duas paredes da tubulação devido à falta de acesso a uma só parede. Em fontes de raios X de alta intensidade, a grande quantidade de elétrons que é gerada não atinge o anodo em uma área pequena, o que resulta em tamanhos focais da ordem de milímetros. Com um tamanho focal desta ordem, não é possível obter resultados de ampliação sem distorção de bordas a uma distância fonte detector praticável. Além disso, a projeção das duas paredes na imagem irá gerar imprecisões na interpretação na posição dos defeitos da peça. Outra

dificuldade é a utilização da técnica no campo, principalmente em ambiente *offshore*, pois nem sempre existe espaço suficiente para posicionar a fonte e o detector a distância necessária da junta para que a imagem seja magnificada.

4.5 – ENSAIOS NO CIRCUITO HIDRÁULICO

4.5.1 – Determinação da Resolução Espacial

Para o levantamento resolução espacial básica foi utilizado um IQI de fio duplo, de acordo com a norma EN 462-5. A figura 4.48 mostra a radiografia do IQI de fio duplo para a técnica de PDVS em uma das juntas, com a presença de água na parte interna do circuito. O valor obtido de Resolução Espacial Básica foi de 100 μm , ou seja, não houve alteração neste parâmetro devido à influência da água.

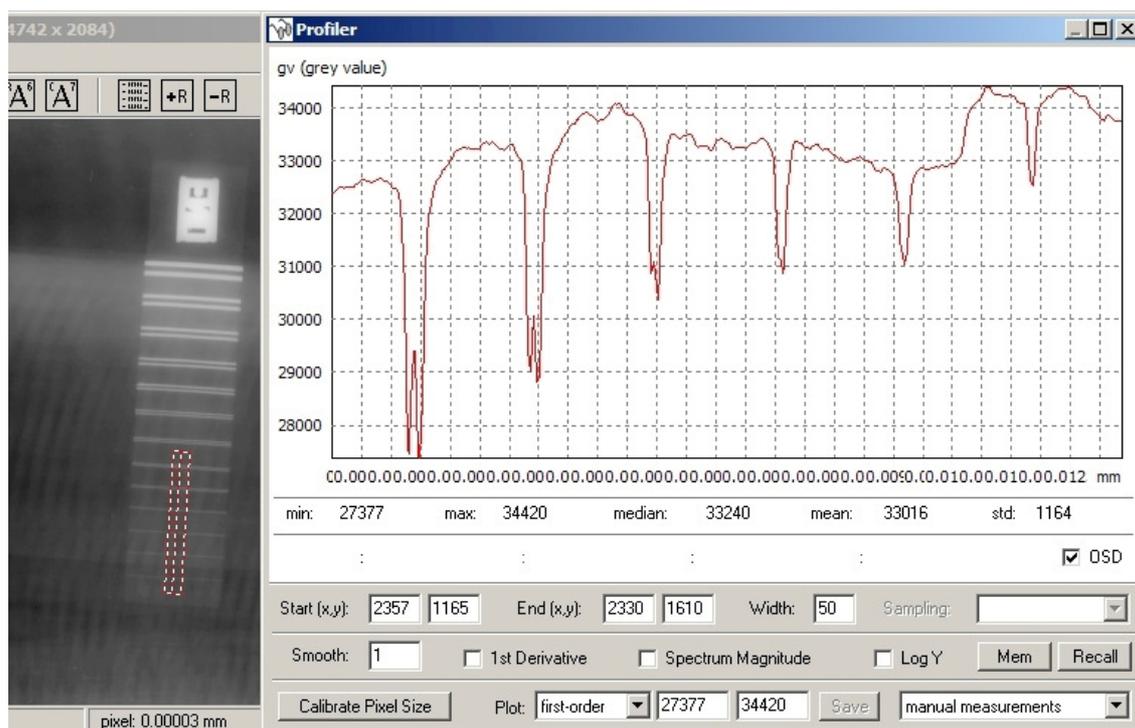


Figura 4.48 – Imagem e perfil do IQI de fio duplo.

4.5.2 – Ensaios de Detecção de Defeitos

Devido à utilização de um novo tubo de raios X, os parâmetros de exposição tiveram que ser ajustados para os ensaios das juntas sem água e conseqüentemente para as juntas radiografadas com a presença de água na tubulação. A tensão foi mantida em 70 kV, a corrente em 3 mA e os tempos de exposição são os mostrados da Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Tempos de Exposição (s)

	Sem Defeito	Falta de Adesivo	Falta de Adesão
Sem Água	5	5	13
Com Água	30	30	60

Os tempos de exposição diferentes para as juntas de falta de adesivo e sem defeito e para as juntas de falta de adesão devem-se a geometria das juntas no circuito, como pode ser mostrado na figura 3.20. As juntas em curva possuem uma espessura menor do que as juntas retas, e essa diferença de espessura resulta na utilização de tempos de exposição diferentes.

As Figuras 4.49 a 4.60 mostram as imagens radiográficas das juntas de falta de adesão, falta de adesivo e sem defeito, nas quatro posições, para o circuito sem e com a presença de água.

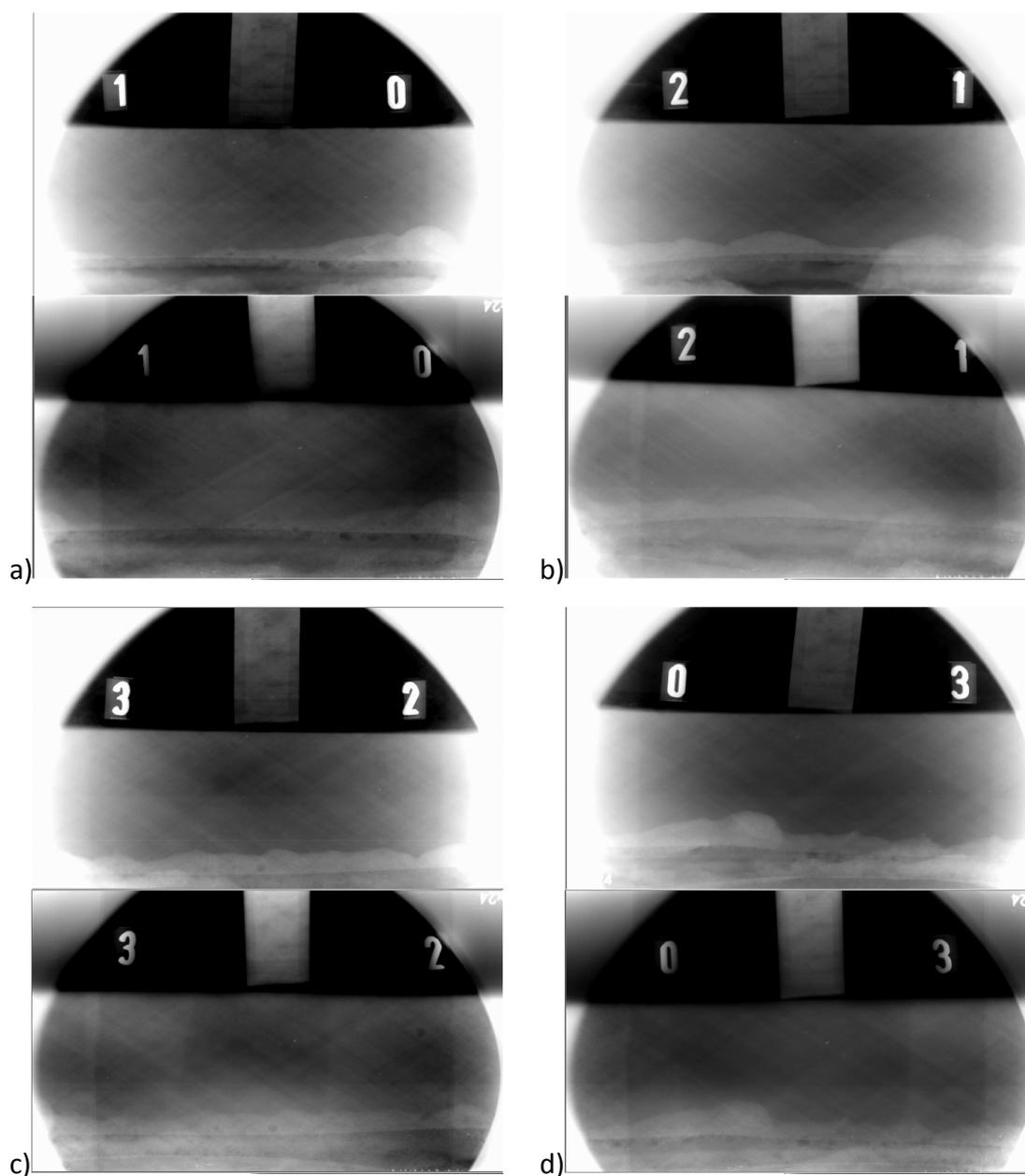


Figura 4.49 – Radiografia da junta com falta de adesão 1, sem (superior) e com (inferior) água. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

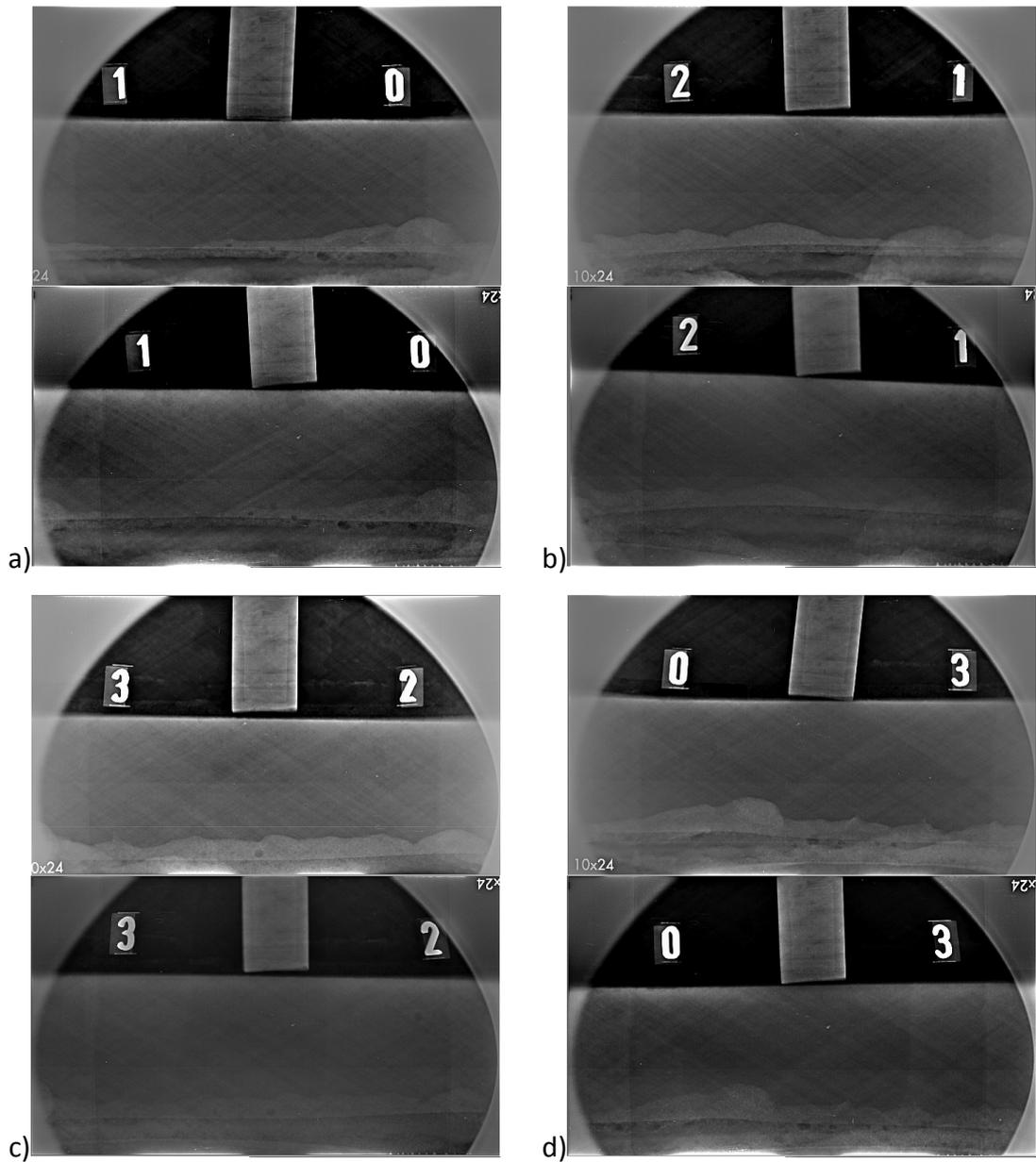


Figura 4.50 – Radiografia da junta com falta de adesão 1, sem (superior) e com (inferior) água, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

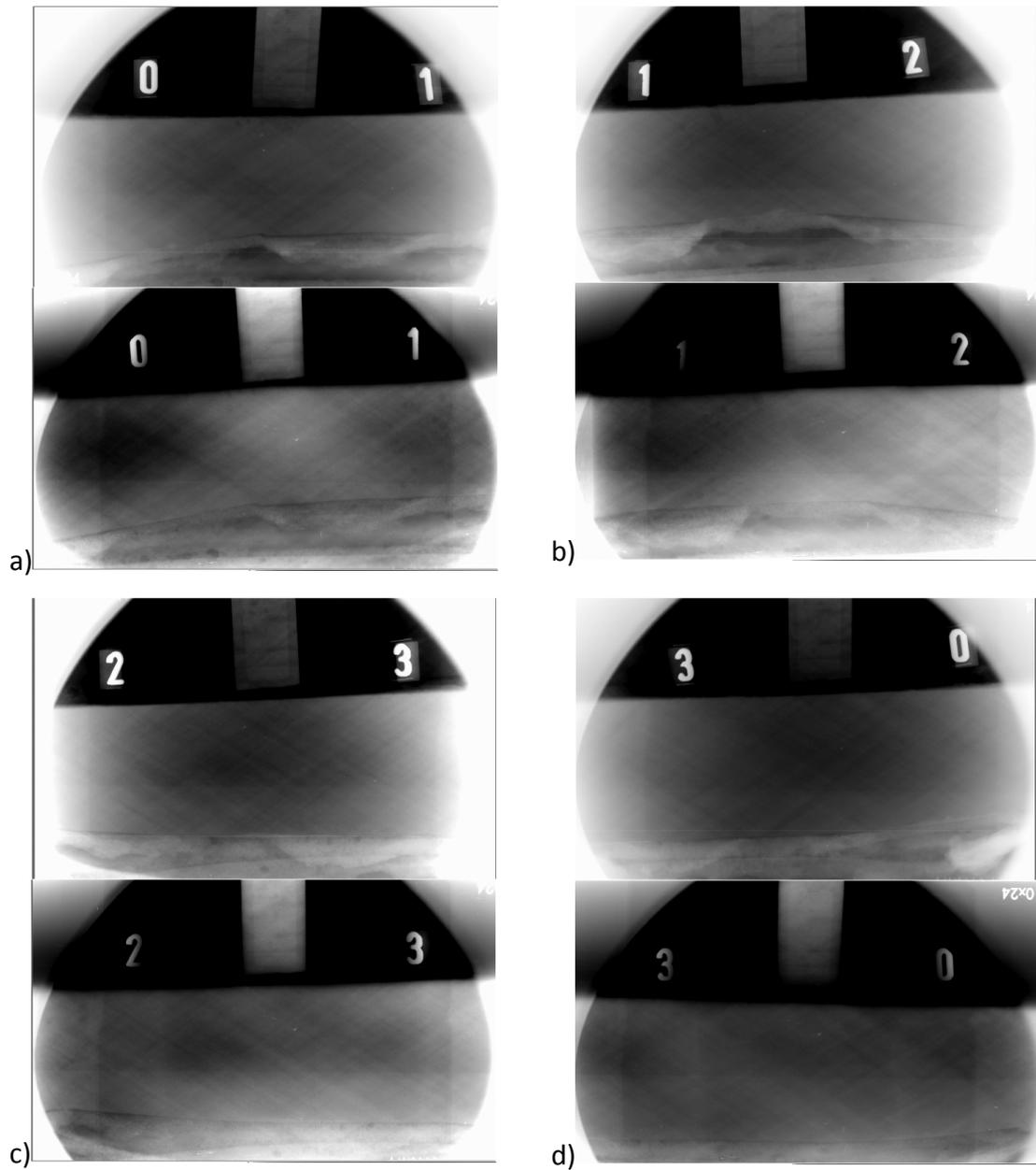


Figura 4.51 – Radiografia da junta com falta de adesão 2, sem (superior) e com (inferior) água. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

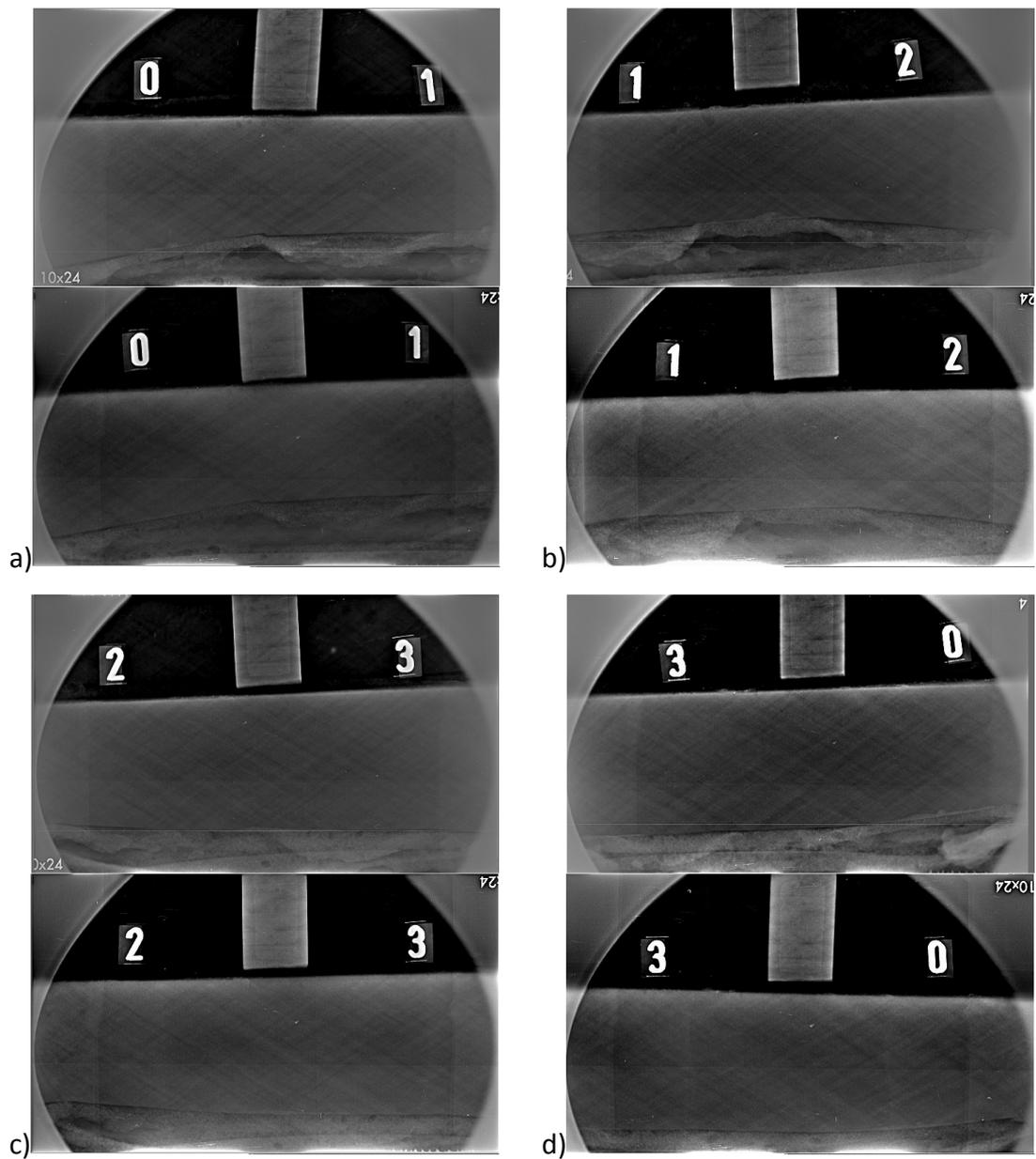


Figura 4.52 – Radiografia da junta com falta de adesão 2, sem (superior) e com (inferior) água, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

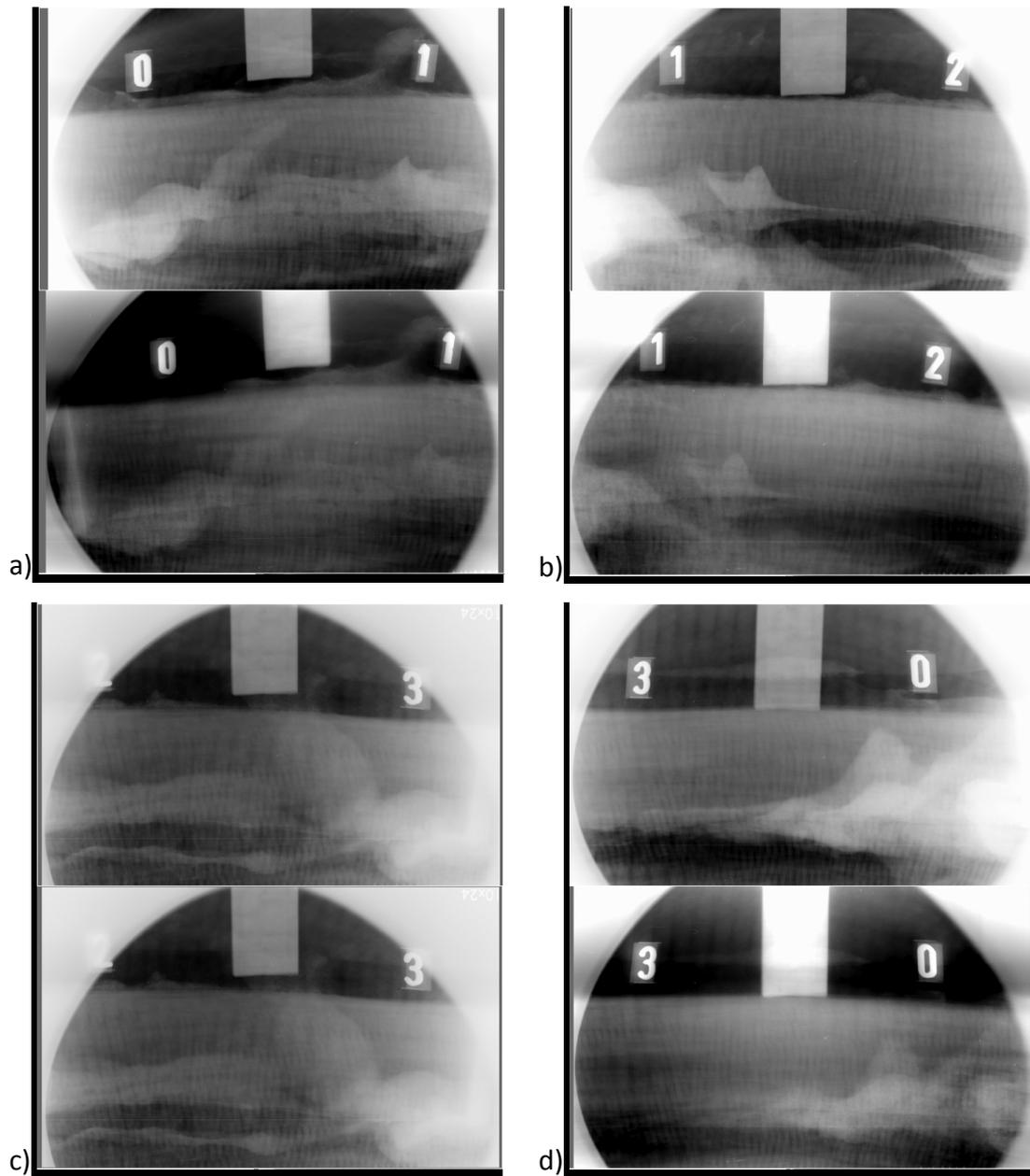


Figura 4.53 – Radiografia da junta com falta de adesivo 1, sem (superior) e com (inferior) água. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

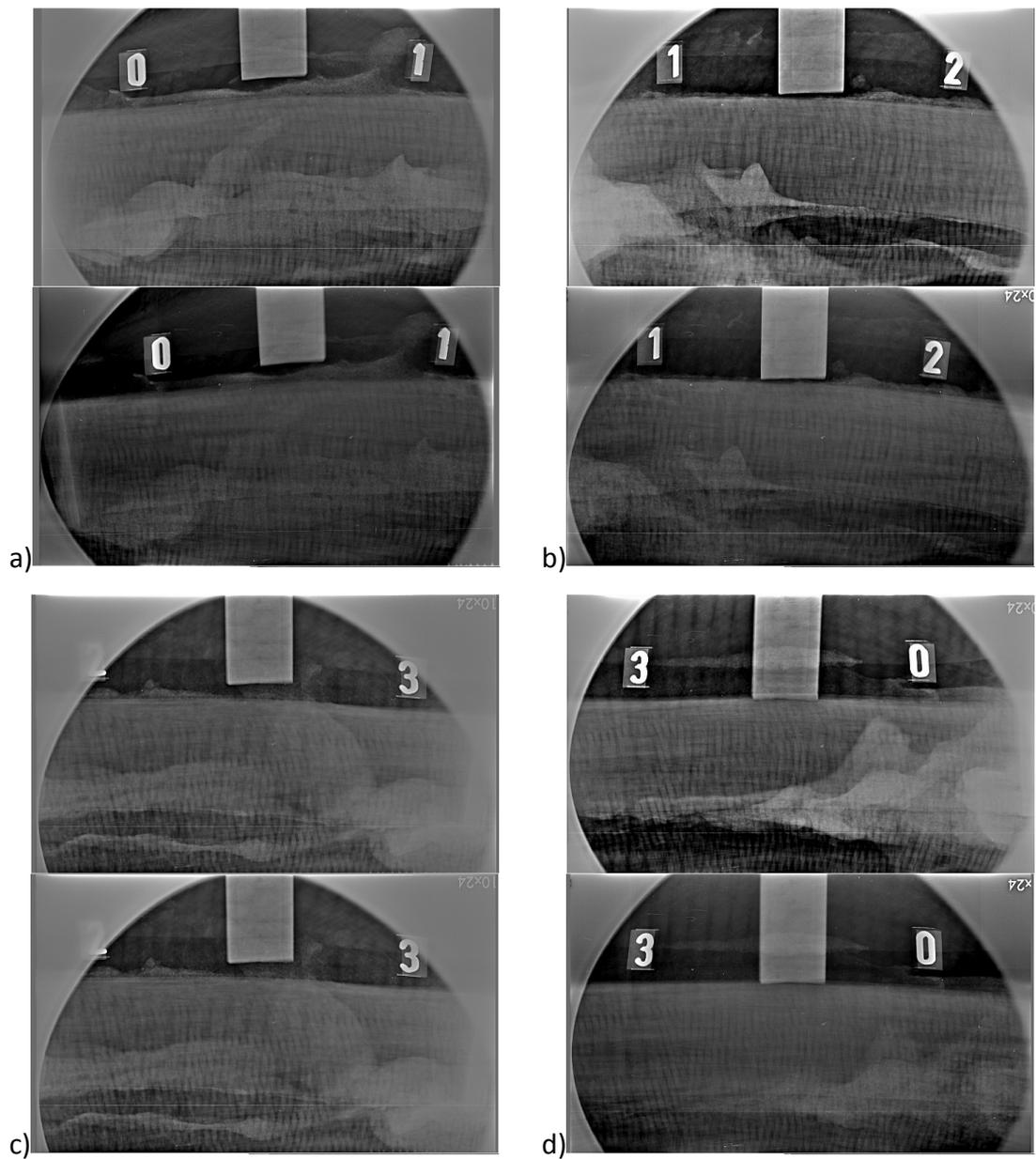


Figura 4.54 – Radiografia da junta com falta de adesivo 1, sem (superior) e com (inferior) água, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

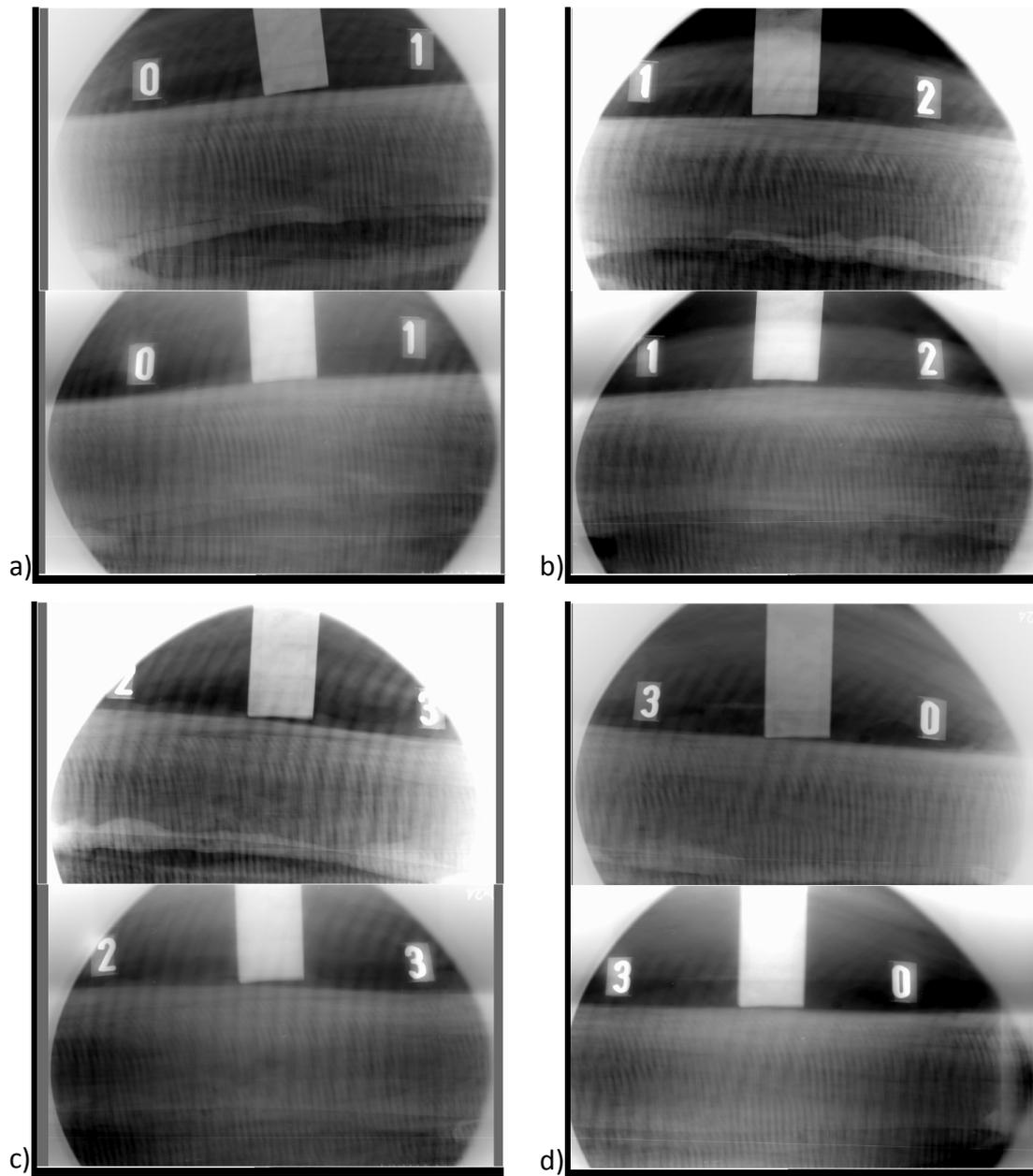


Figura 4.55 – Radiografia da junta com falta de adesivo 2, sem (superior) e com (inferior) água. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

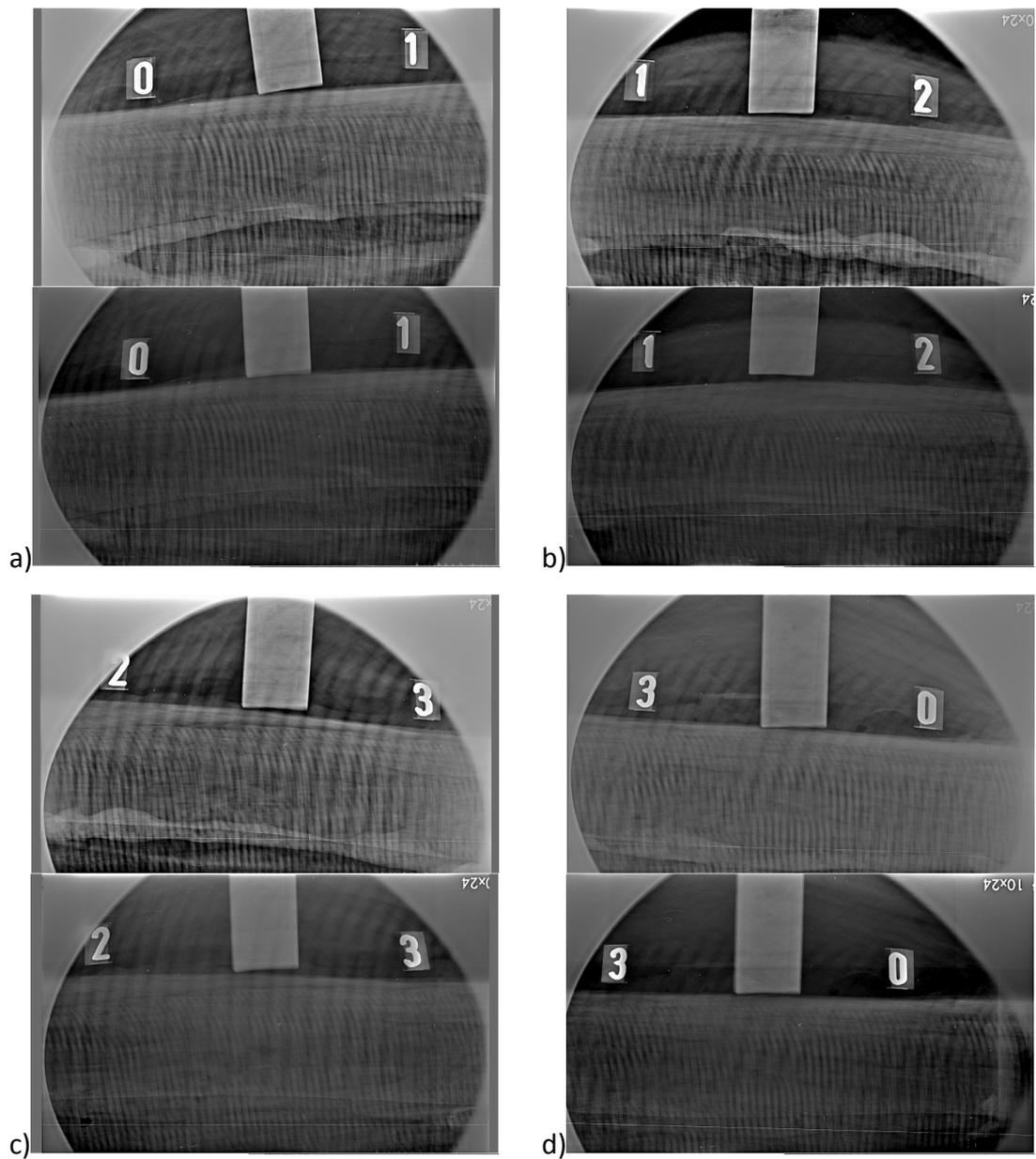


Figura 4.56 – Radiografia da junta com falta de adesivo 2, sem (superior) e com (inferior) água, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

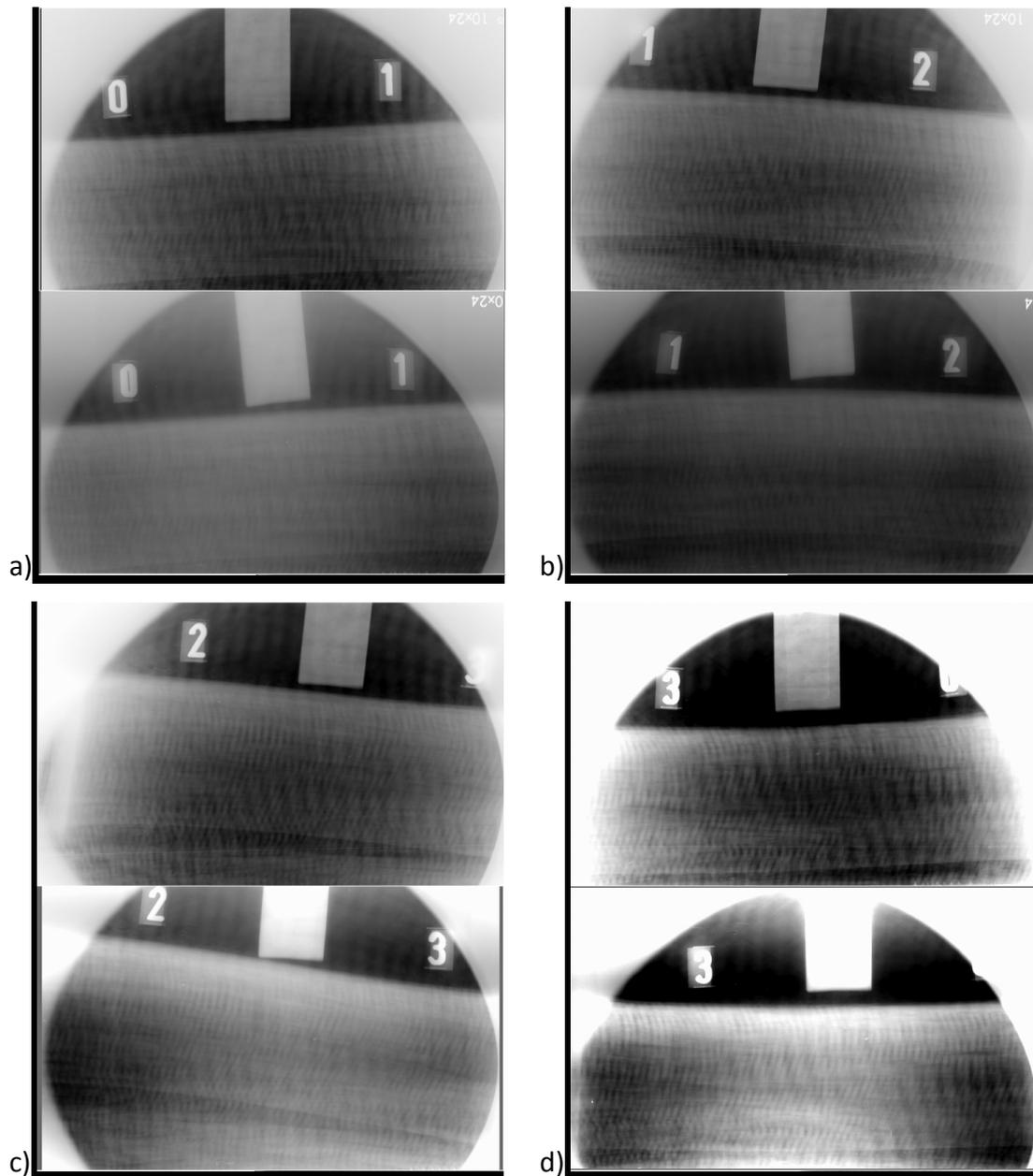


Figura 4.57 – Radiografia da junta sem defeito 1, sem (superior) e com (inferior) água.
 a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

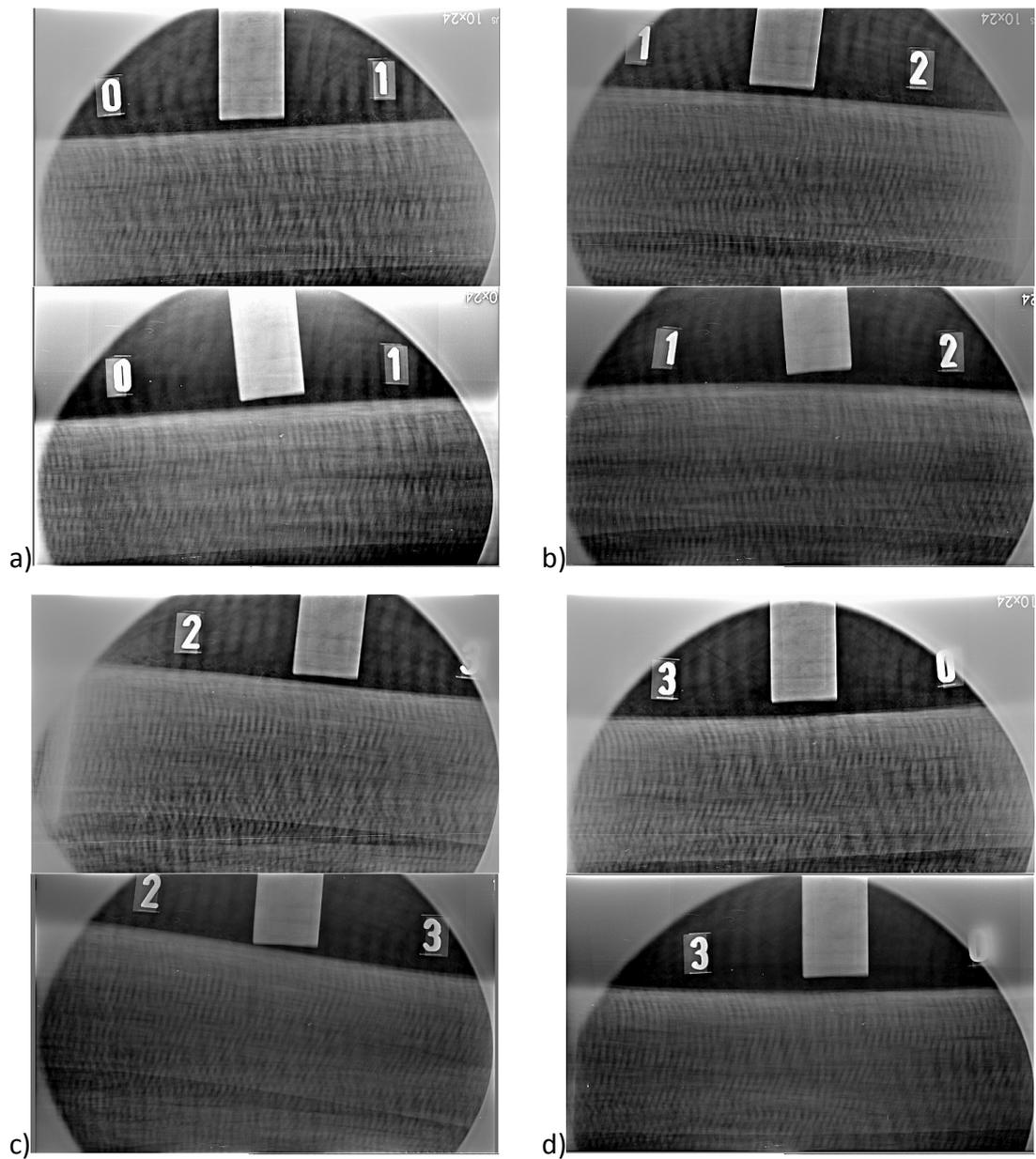


Figura 4.58 – Radiografia da junta sem defeito 1, sem (superior) e com (inferior) água, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

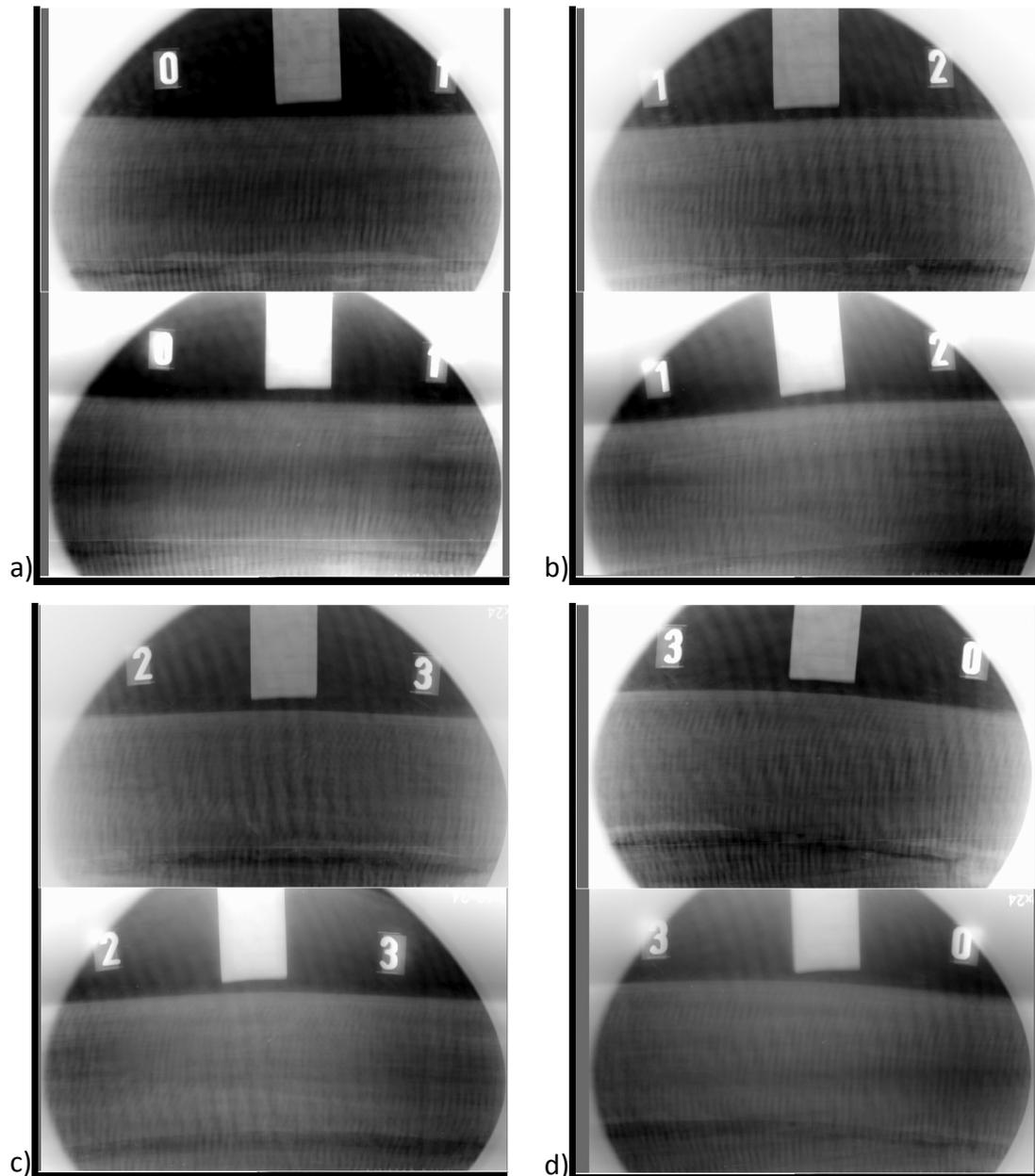


Figura 4.59 – Radiografia da junta sem defeito 2, sem (superior) e com (inferior) água.
a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

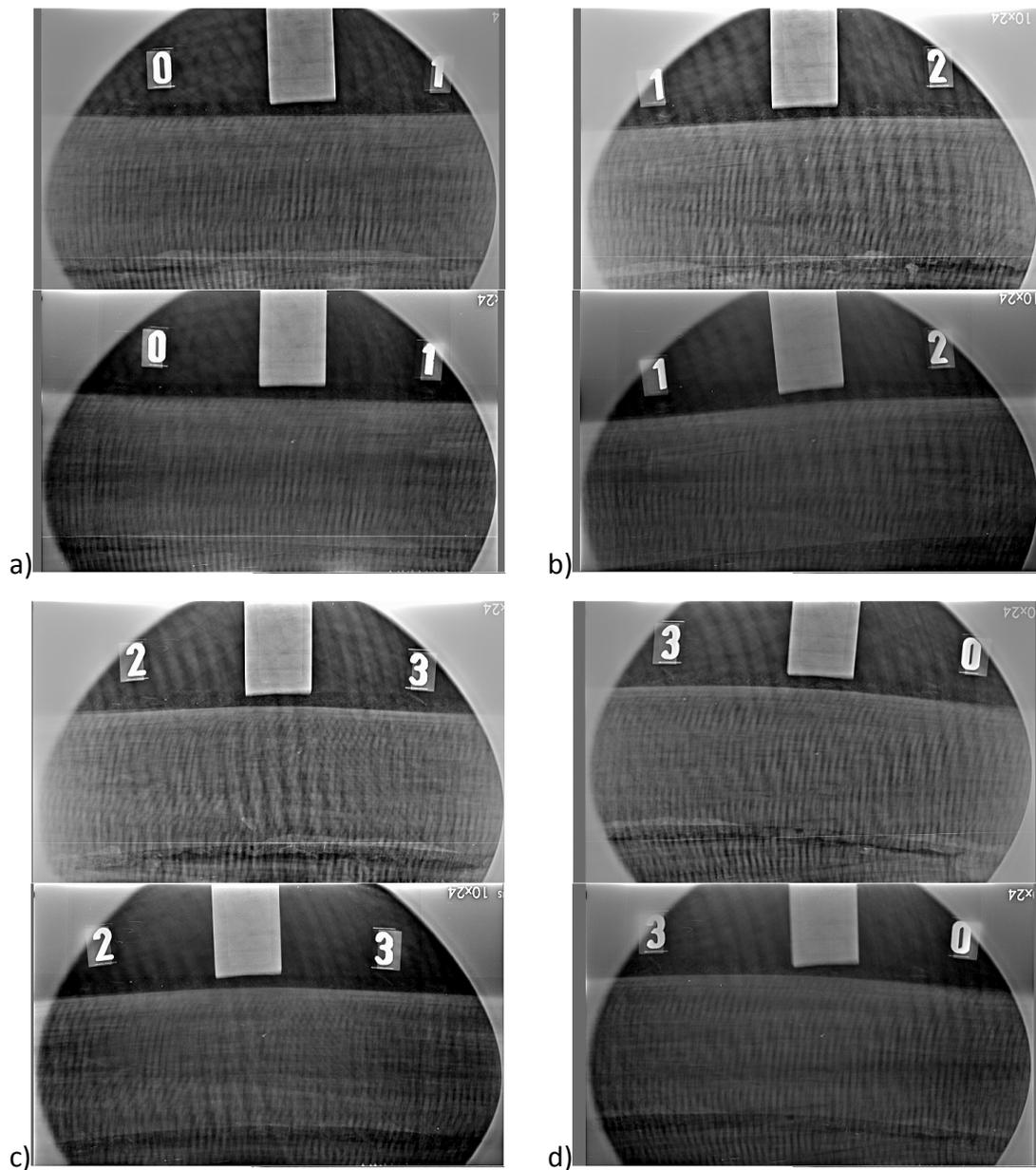


Figura 4.60 – Radiografia da junta sem defeito 2, sem (superior) e com (inferior) água, processadas com o filtro computacional “Enhance Details”. a) posição 0-1, b) posição 1-2, c) posição 2-3 e d) posição 3-0.

Nos ensaios realizados no circuito hidráulico, em todas as imagens radiográficas foi possível observar os furos do padrão de sensibilidade, porém com menor nitidez quando há a presença de água no interior da tubulação, devido às interações de espalhamento da radiação. Tanto nas imagens sem água quanto nas com água, não foram detectados vazios nas juntas de falta de adesivo e sem defeito, apenas algumas indicações nas juntas de falta de adesão. Nestas juntas, os defeitos detectados foram os mesmos nas imagens com a tubulação vazia e cheia. Na junta de falta de adesivo 1, pode ser percebido que não houve o perfeito acoplamento dos componentes, levando a crer que aconteceu alguma falha no processo de montagem.

A tabela 4.8 mostra os valores de SNR_N obtidos em cada uma das imagens.

Tabela 4.8 – Valores de SNR_N para as imagens radiográficas da juntas coladas.

Falta de Adesão				Falta de Adesivo				Sem Defeito			
Junta 1		Junta 2		Junta 1		Junta 2		Junta 1		Junta 2	
Com Água	Sem Água	Com Água	Sem Água	Com Água	Sem Água	Com Água	Sem Água	Com Água	Sem Água	Com Água	Sem Água
224	176	220	166	191	139	176	135	179	142	175	129
191	192	223	181	181	140	188	129	176	122	177	126
187	177	226	173	187	124	184	180	196	144	166	128
232	175	227	184	183	137	192	179	200	156	150	153

A análise destas imagens mostrou, assim como nas anteriores, que a SNR_N apresentou valores superiores aos requeridos em normas para materiais metálicos, obtendo qualidade satisfatória para a análise de detecção de defeitos.

Em todos os ensaios, a resolução espacial básica (BSR) foi obtida apenas no sentido paralelo a varredura do laser. Isso se deve ao fato de neste sentido a resolução ser pior do que no sentido perpendicular a varredura do laser, impondo-nos o limite de resolução das imagens geradas. Apesar do tamanho de pixel ser de 50 μm , o valor de BSR de 100 μm foi obtido devido a fatores que podem influenciar na resolução, como a distância fonte detector pequena (480 para o tubo de 16 polegadas e 191 mm para o tubo de 4 polegadas) e a espalhamentos no interior da peça devido a sua geometria cilíndrica.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões acerca dos resultados obtidos e as sugestões para desenvolvimentos futuros.

5.1 - CONCLUSÕES

Os experimentos realizados mostraram a viabilidade da utilização das técnicas radiográficas para a inspeção de juntas coladas de dutos compósitos com resina epóxi.

Em todos os testes realizados, para os diâmetros de 4 e 16 polegadas, foram detectados os furos passantes do padrão de sensibilidade. Isso mostra que é possível detectar pequenas regiões de falta de adesivo e este padrão pode ser utilizado como indicador de qualidade de imagem para a avaliação da sensibilidade radiográfica em materiais compósitos, em analogia com os IQIs de furos usados nas radiografias de materiais metálicos.

Para os testes de laboratório com os corpos de prova de 16 e 4 polegadas, os melhores resultados foram para a tensão de 60 kV, porém o tempo de exposição para esta técnica foi muito elevado em relação às demais. Assim, a técnica definida para a realização deste tipo de inspeção foi com tensão de 70 kV.

Os corpos de prova com falta de adesão, assim como nos sem defeitos, apresentaram o mesmo tipo de indicação de vazios. Porém a falta de adesão não pode ser claramente identificada. Como a junta possui a quantidade correta de adesivo e somente não há adesão, o espaçamento entre a camada de adesivo e a parede do duto não foi visível na radiografia, pois as camadas estão sobrepostas na imagem.

Os experimentos com a adição de elementos de contraste radiográfico mostrou bastante eficácia na detecção de indicações de vazios, devido ao maior realce entre as regiões sem ou com pouco adesivo e a cola, pois esta teve o seu coeficiente de absorção

umentado com a inclusão de elementos de alto número atômico na mistura.

Deve-se ressaltar que as imagens obtidas por radiografia computadorizada mostram as mesmas indicações que as imagens com radiografia convencional, que é a técnica radiográfica utilizada atualmente para a inspeção destes tipos de descontinuidades. Assim, a técnica de radiografia computadorizada pode ser validada como ferramenta de inspeção de materiais compósitos. A técnica mostrou-se ainda ser capaz de detectar descontinuidades em juntas em operação, ou seja, com a presença de fluidos no interior da tubulação. Esse fato é de grande vantagem, pois não há a necessidade de parar a produção e esvaziar a linha para a execução da inspeção.

Com a técnica de radiografia computadorizada foi possível detectar as indicações de defeitos utilizando uma dose de radiação bastante reduzida (cerca de 25%) em relação a dose com radiografia convencional. Outra vantagem com relação a esta técnica é a possibilidade de processamento da imagem através de filtros computacionais. Estes filtros mostram-se de grande utilidade na detecção das indicações de defeitos, gerando imagens com grande realce no contraste.

5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de novos ensaios em juntas coladas com elementos de contraste inseridos no adesivo, variando o percentual do contraste na mistura, para a verificação da quantidade ótima para a obtenção de melhores resultados de detectabilidade. A técnica radiográfica de PDVS deve também ser estudada futuramente, já que é a técnica que será empregada em situações reais de inspeção.

- Realização de novos ensaios com magnificação para a técnica radiográfica de PDVS visando determinar a melhor geometria para a inspeção. É necessário também estudar outros tipos de fontes de pequeno tamanho focal com maior intensidade que a utilizada nesse trabalho para que a inspeção seja realizada com tempos de exposição praticáveis.

- Realização de inspeção para juntas em serviço contendo defeitos reais para a avaliação da detectabilidade do sistema.
- Desenvolvimento de um IQI para a avaliação do contraste radiográfico, de acordo com normas para radiografia de materiais metálicos, seguindo o estudo realizado neste trabalho com o padrão de sensibilidade.
- Realização de ensaios em juntas coladas utilizando fontes de radiação γ , visando avaliar sua influência na detectabilidade dos defeitos. A utilização de radioisótopos é mais prática que equipamentos de raios X, principalmente em ambiente *offshore* devido à dificuldade de acesso, porém deve-se determinar o isótopo com energia adequada para a inspeção de materiais de baixo número atômico como os compósitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA F. H. *et al*, “Design and Fabrication of Low Cost Filament Winding Machine”, **Materials and Design**, vol. 28, pp. 234-239, 2007.

ANDREUCCI, R., “A **Radiologia Industrial**”, ed. Março/2010 – disponível na internet no site http://www.abende.org.br/down2/radiologia_ind.pdf em 30/11/2010.

ASTROM, B. T., “Pultrusion”, **Processing of Composites**. Series Editor: Warren Baker, 2000.

BARNES, G. T., “Digital x-ray image capture with image intensifier and storage phosphor plates: imaging principles, performance and limitations”, **Proceedings of Digital Imaging**, pp 23–48, 1993

BENUTZER, J., “Photomultiplier Schema” – disponível na internet no site http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photomultiplier_schema_de.png em 15/10/2010.

CALLISTER JR, W. D., “*Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*”, 5 ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.

CARVALHO, F. J. X., “*Fiberglass X Corrosão*”, São José dos Campos, Brasil, 1992.

Correa, S. C. A., “**Otimização da Dose e da Imagem radiográfica Digital de Tórax Usando Modelagem Computacional**”, Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

DITABIS, “**DITABIS Imaging Plate Tecnology for all Applications in Transmission Eletronic Microscopy**” – disponível na internet no site <http://www.ditabis.com> em 15/01/2007.

DOLBANYA, I. P., KULIPANOV, G. N., LYAKH, *et al.*, “Micro Spatial Resolution X-ray Image Plates With Non-erasing Reading”, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, vol. 359, pp. 376-378, 1995.

DURR NDT, HD-CR 35 NDT Data Sheet – disponível na internet no site http://www.duerr-ndt.de/_pdfs/HD-CR_35_NDT_GB.pdf em 15/10/2010.

EN 14784-1:2005 – **Industrial Computed Radiography with Storage Phosphor Imaging Plates – Part 1: Classification of Systems**, September/2005.

EN 14784-2:2005 – **Industrial Computed Radiography with Storage Phosphor Imaging Plates – Part 2: General Principles for Testing of Metallic Materials Using X-Rays and Gamma Rays**, September/2005.

EWERT, U., STADE J., “Comparative analysis of image quality from X-ray radiography and gamma radiography using selenium 75 and iridium 192”, **Materials Evaluation**, vol. 57, n^o2, pp. 117-121, 1999.

EWERT, U., ZSCHERPEL, U., “Radiographic Testing - A Comparison of Standards for Classical and Digital Industrial Radiology”, **15th WCNDT – World Conference on NDT**, October/2000, Rome, Italy.

EWERT, U., ZSCHERPEL, U., BAVENDIEK, K., “Film Replacement By Digital X-Ray Detectors – The Correct Procedure and Equipment”, **16th WCNDT – World Conference on NDT**, August-September/2004, Montreal, Canada.

FARO, A. A. S., **Desenvolvimento de Tubos Compósitos Produzidos por Enrolamento Filamentar para Possíveis Aplicações como Risers Rígidos**, Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

FIORELLI, J., **Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço em Vigas de Madeira**, Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FUJITA, H., UEDA, K., MORISHITA, J., FUJIKAWA, T., OHTSUKA, A. AND SAI, T., “Basic imaging properties of a computed radiographic system with photostimulable phosphors” **Medical Physics**, vol. 16, pp. 52–59, 1989.

GIBSON, R. F., “**Principles of Composites Material Mechanics**”, Ed. 1, New York, Mc Graw Hill, 1994.

GIBSON A. G. “Composite Materials in the Offshore Industry”, **Comprehensive Composite Materials**, vol. 6, pp. 459 – 478, 2000.

GURVICH, A. M., HALL, C., KAMENSKIKH, I. A. *et al.*, “Phosphors for Luminescent Imaging Plates”, **Journal of X-ray Science and Technology**, vol. 6, pp. 48-62, 1996.

HALMSHAW, R., KOWOL, T., **Image Quality Indicators in Industrial Radiography**, Technical Information, IE-NDT Ltd, 2001.

ISO 14692-4 – **Petroleum and natural gas industries - Glass-reinforced plastics (GRP) piping - Part 4: Fabrication, installation and operation**, 2002;

KNOLL, G. F., “**Radiation Detection and Measurement**”, 3 ed., New York, Willey, 2000.

M-622 – **Fabrication and Installation of GRP Piping Systems**, NORSOK standard, 1994;

MANGO, S. A., “How to Evaluate the Radiographic Performance Envelope of a Computed Radiography System”, **Materials Evaluation**, vol. 64, nº 3, pp. 297-302, 2006.

MARINHO, C. A. *et al.*, “Inspeção de Tubos de Resina Reforçada por Fibras de Vidro”, **10ª COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos**, Maio/2009, Salvador, Brasil.

MAZUR, S., “Flexible Storage Phosphor Plate Versus Film-Based Technology for Erosion/Corrosion Profiling”, **AICHE Spring National Meeting**, April/2006, Orlando/USA.

OLIVEIRA, F. M., **Estudo de Sistema de Radiografia Computadorizada com Uso de Placas de Fósforo**, Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, D. F., **Análise da Radiografia Computadorizada em Condições de Águas Profundas**”, Dissertação de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

PILATO, L. A., MICHINO, M. J., “**Advanced Composite Materials**”, New York, Springer-Velag, 1994.

PRICE, J. C., “The ‘State of the Art’ in Composite Material Development and Applications for the Oil and Gas Industry”, **Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference**, May/2002, Kitakyushu/Japan

SCURI, A. E., “**Fundamentos da Imagem Digital**”, disponível na internet no site <http://www.inf.ufes.br/~thomas/graphics/www/apostilas/CIV2801ScuriImgDigital.pdf> em 22/02/2010.

SEIBERT, J. A., “Physics of Computed Radiography”, **41st Annual Meeting of the American Association of Physicists in Medicine**, July/1999, Nashville, USA.

SONODA, M., TAKANO, M., MIYAHARA, J. and KATO, H. “Computed radiography utilizing scanning laser stimulated luminescence” **Radiology**, vol. 148, pp. 833–838, 1983.

SPAGNI, D. A. e GIBSON, A. G., **Introduction in to Glass Reinforced Plastics**, Bondstrand Technical Bulletin – Ameron International, 1998.

SPRAWLS, P., **Physical Principles of Medical Imaging**, Madison, Wisconsin: Medical Physics, 2 ed., Wisconsin, USA, 1995.

STRINGFELLOW, W. D., "Fiberglass Pipe Handbook", **Fiberglass Pipe Institute**, New York, 1992.

TAKAHASHI, K., MIYAHARA, J. and SHIBAHARA, Y.: "Photostimulated Luminescence (PSL) and Color Centers in BaFX:Eu²⁺ (X=Cl, Br, I) Phosphors," **Journal of Electrochemical Society**, pp. 1492-1494, 1985.

TAKAHASHI, K., "Progress in Science and Technology on Photostimulable BaFX:Eu²⁺ (X = Cl, Br, I) and Imaging Plates", **Journal of Luminescence**, vol. 100, pp. 307-315, 2002.

TAUHATA, L. et al., **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão, Rio de Janeiro, 2003.

THORNS, M., "The Quantum Efficiency of Radiographic Imaging with Image Plates", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, vol. 378, pp. 598-611, 1996.

THORNS, M., "The Dynamic Range of X-ray Imaging With Image Plates", **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, vol. 389, pp. 437-440, 1997.

VARMA, I. K. e GUPTA, V. B., "Thermosetting Resin - Properties", **Comprehensive Composite Materials**, vol. 2, pp. 1-56, 2000.

ZSCHERPEL, U., EWERT, U., OSTERLOH, K., "Unsharpness Characteristics of Digital Detectors for Industrial Radiographic Imaging", **International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology**, March/1999, Berlin, Germany.