



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ FELIPE ANDRÉ GOMES WAVRIK

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADO DE ALTA ENERGIA PARA
INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DOS
TIRANTES DE AÇO NO CONCRETO ARMADO DE LINHA DE TRANSMISSÃO
ENERGIZADA DE 500 KV**

Recife

2025

JOSÉ FELIPE ANDRÉ GOMES WAVRIK

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADO DE ALTA ENERGIA PARA
INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DOS
TIRANTES DE AÇO NO CONCRETO ARMADO DE LINHA DE TRANSMISSÃO
ENERGIZADA DE 500 KV**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof.Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves

Orientador Externo: Prof.Dr. Armando Hideki Shinohara

Recife

2025

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Wavrik, José Felipe André Gomes.

Desenvolvimento de um Sistema de Radiografia Computadorizado de Alta Energia para Inspeção e Monitoramento da Integridade Estrutural dos Tirantes de Aço no Concreto Armado de Linha de Transmissão Energizada de 500 KV / José Felipe André Gomes Wavrik. - Recife, 2025.

263f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Kleber Gonçalves Bezerra Alves.

Coorientação: Armando Hideki Shinohara.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica, Concreto armado, Fundações; Torre de Concreto; 2. Linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV; Tirantes de Aço; 3. Radiografia Computadorizada, Raios-X de Alta Energia; Betatron 2 a 7.5 MeV; 4. Imaging Plate; Filtros Físico de Cobre e Chumbo, Processamento de Imagem Digital. I. Alves, Kleber Gonçalves Bezerra. II. Shinohara, Armando Hideki. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JOSÉ FELIPE ANDRÉ GOMES WAVRIK

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADO DE ALTA ENERGIA PARA
INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DOS
TIRANTES DE AÇO NO CONCRETO ARMADO DE LINHA DE TRANSMISSÃO
ENERGIZADA DE 500 KV**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Ricardo Tadeu Lopes (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profº. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Marcos Pereira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Cezar Henrique Gonzales (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esta tese, a meus queridos pais Carlos e Elza Wavrik (*in memoriam*). Como meus primeiros e mais assíduos professores da vida, que me ensinaram mais que qualquer pessoa e ser fundamental para toda a minha formação como ser humano na vida, a quem eu jamais terei palavras suficientes para expressar todo meu amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves e Prof. Armando Hideki Shinohara pelos ensinamentos, sugestões, tranquilidade repassadas durante suas orientações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM da Universidade Federal de Pernambuco. À Companhia Hidroelétrica do São Francisco, por ter sido o gerente do projeto de P&D.

Ao BAM – Federal Institute for Materials and Testing, Berlin, Alemanha, em especial ao Dr. Uwe Zscherpel por comentários e sugestões sobre realização de ensaios em concreto.

Aos Colegas Clayton e Alfredo funcionários do CRCN, pela atenção e destinação de local e horário para os ensaios de radiografia de alta energia Betatron e no acompanhamento das medições de dose nas áreas do laboratório.

A Sra. Luana Antero de Melo e Sr. Jorge Rodrigo da Silva Oliveira, secretários do Programa de pós-graduação da UFPE.

A colega Hissae Fujiwara pelos trabalhos de digitalização das imagens.

Aos colegas da Universidade Federal de Pernambuco, pela convivência e amizade.

A Deus, por tudo, principalmente por me dar saúde e colocar pessoas tão especiais no meu caminho, que me ajudaram a superar os obstáculos e motivaram-me a seguir adiante.

À minha esposa Rosineide Wavrik e filhos: Fabiana, Felipe Filho, Fernando, Marina, Jennifer, Jonathan e Mário, por entenderem minha ausência nas horas de estudo. Muito haveria a ser dito, no aqui e agora dessa conquista. Mas vale aqui um breve registro: A Ciência e a Engenharia, em particular, precisam de quem por elas se dedique, sem reservas, consagrados ao desenvolvimento de novas tecnologias a serem utilizadas no diagnóstico de suas causas e na qualidade de pesquisador, missão dada é missão cumprida.

Finalmente, agradeço ao convívio com meus irmãos, Augusto, Batista, Teresa e Juliana (todos com a saudade *in memoriam*) e ainda, Guilherme, Caroli, Rosa, Fernanda e Karla, de nossa maravilhosa Família Wavrik, a quem também dedico essa tese, por terem sido verdadeiros inovadores na minha vida e um privilégio de poder partilhar a nossa convivência para terminar essa maratona. Muito obrigado!

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável, para aprender a conhecer a influência libertadora do reino da alma, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

Albert Einstein

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

“A paciência e a perseverança, duas dádivas preciosas que Deus sempre concede aos que tem boa vontade, vencem todas as dificuldades que se encontram no caminho da salvação.”

Frei Luiz

“Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você faz com aquilo que você sabe.”

Aldous Huxley

“Para nós os grandes homens não são aqueles que resolveram os problemas, mas aqueles que os descobriram.”

Albert Schweitzer

“As ideias e estratégias são importantes, mas o verdadeiro desafio é a sua execução.”

Percy Barneville

“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que superou no caminho.”

Abraham Lincoln

“Neste período, aprendi que uma tese ou qualquer outro trabalho é a extensão da vida do autor. Então, para que algo de valor seja produzido, a pessoa primeiro deve criar algo de valor em si. Pessoa e obra são consistentes com o resultado. Por este motivo, nunca deixei de sonhar, pois sonhar é bom, mas melhor ainda é realizar o sonho.”

Autor

RESUMO

A inspeção e o monitoramento não destrutivos de descontinuidades ocultas nos tirantes e stub no interior de grandes estruturas de concreto armado, como são utilizados em linhas de transmissão, representam um desafio de alta complexidade no campo, especialmente quando a espessura da estrutura é igual ou superior a 200 mm e está energizada. Métodos tradicionais de ensaio não destrutivo (END), como radar de penetração no solo (GPR), ultrassom, martelo de rebote, embora amplamente empregados na inspeção de concreto armado, apresentam limitações significativas na detecção de falhas internas nos tirantes e no stub em elementos de grande espessura. Nesse contexto, a radiografia com raios-X de alta energia emerge como uma alternativa viável. Contudo, seu uso é desafiado por questões relacionadas ao controle do espalhamento de radiação devido ao efeito Compton, à necessidade de imagens radiográficas de alta qualidade e à indispensabilidade de planos de proteção radiológica gerais e específicos. Detectores de radiografia digital de alta sensibilidade, como os *Imaging Plate*, também impõem desafios operacionais quando utilizados com feixes de raios-X de alta energia, pois foram desenvolvidas para aplicações de raios-X de baixa energia. Neste estudo, testamos e avaliamos o desempenho de um sistema radiográfico composto de um gerador transportável de raios-X betatron, desenvolvido para aplicações industriais e operando com energias de raios-X de 2 MeV a 7,5 MeV com ajuste de energia de 0,1 MeV. Foram empregados detectores de alta sensibilidade *Imaging Plates* de três fabricantes distintas, uma escolha motivada pela sua baixa taxa de dose em comparação com aceleradores lineares (LINACs), o que os torna ideais para este tipo de aplicação. Com o intuito de realçar as regiões de interesse (ROI) das imagens radiográficas, técnicas de processamento de imagem digital foram empregadas utilizando softwares comerciais. A metodologia experimental incluiu a realização de ensaios laboratoriais em dois tipos de corpos de prova de concreto armado encontrado em campo: seções de concreto armado de 200 mm × 200 mm e de 600 mm × 600 mm, e em blocos cilíndricos de concreto sem armadura com 250 mm de diâmetro até 1.500 mm de comprimento. Tais ensaios foram cruciais para a avaliação da penetração dos feixes de raios-X de alta energia e para a definição de parâmetros radiográficos ótimos visando aplicação em campo. Além disso, foram investigados uso de filtros físicos de cobre e de chumbo com o propósito de otimizar a relação sinal-ruído buscando minimizar o efeito Compton na qualidade de imagem. Os resultados obtidos validaram a capacidade de gerar imagens radiográficas de alta qualidade no interior de estruturas de concreto armado pelo sistema de radiografia computadorizada de alta energia. Verificou-se que a análise detalhada das regiões de interesse (ROI) foi substancialmente aprimorada pela combinação dos filtros físicos de cobre e chumbo e com o processamento de imagem digital, evidenciando a criticidade dessas técnicas para a precisão diagnóstica. Adicionalmente, um fator técnico crucial para o uso em campo do sistema radiográfico com betatron testado em laboratório é o emprego de um nobreak de 10 kVA para garantir o fornecimento de energia de qualidade.

Palavras-chave: Concreto armado, Fundações; Torre de Concreto, Linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV; Tirantes de Aço, Radiografia Computadorizada, Raios-X de Alta Energia; Betatron; Imaging Plate; Filtros Físico de Cobre e Chumbo, Processamento de Imagem Digital,

ABSTRACT

Non-destructive inspection and monitoring of hidden discontinuities in tie rods and stubs within large reinforced concrete structures, such as those used in transmission lines, presents a highly complex challenge in the field, especially when the structure thickness is 200 mm or greater and the structure is energized. Traditional non-destructive testing (NDT) methods, such as ground-penetrating radar (GPR), ultrasound, and rebound hammer, while widely used in reinforced concrete inspection, have significant limitations in detecting internal flaws in tie rods and stubs in thick elements. In this context, high-energy X-ray radiography emerges as a viable alternative. However, its use is challenged by issues related to controlling radiation scattering due to the Compton effect, the need for high-quality radiographic images, and the indispensability of general and specific radiation protection plans. High-sensitivity digital radiography detectors, such as Imaging Plates, also pose operational challenges when used with high-energy X-ray beams, as they were developed for low-energy X-ray applications. In this study, we tested and evaluated the performance of a radiographic system composed of a transportable betatron X-ray generator, developed for industrial applications and operating with X-ray energies from 2 MeV to 7.5 MeV with an energy adjustment of 0.1 MeV. High-sensitivity Imaging Plate detectors from three different manufacturers were employed, a choice motivated by their low dose rate compared to linear accelerators (LINACs), making them ideal for this type of application. In order to enhance the regions of interest (ROI) of the radiographic images, digital image processing techniques were employed using commercial software. The experimental methodology included conducting laboratory tests on two types of reinforced concrete specimens found in the field: reinforced concrete sections of 200 mm × 200 mm and 600 mm × 600 mm, and on unreinforced cylindrical concrete blocks ranging from 250 mm in diameter to 1,500 mm in length. These tests were crucial for evaluating the penetration of high-energy X-ray beams and for defining optimal radiographic parameters for field application. Furthermore, the use of copper and lead physical filters was investigated to optimize the signal-to-noise ratio and minimize the Compton effect on image quality. The results obtained validated the ability of the high-energy computed radiography system to generate high-quality radiographic images inside reinforced concrete structures. It was found that the detailed analysis of regions of interest (ROI) was substantially improved by the combination of copper and lead physical filters and digital image processing, highlighting the criticality of these techniques for diagnostic accuracy. Additionally, a crucial technical factor for the field use of the betatron radiographic system tested in the laboratory is the use of a 10 kVA uninterruptible power supply (UPS) to guarantee a high-quality power supply.

Keywords: Reinforced concrete, Foundations; Concrete Tower, 230 kV and 500 kV transmission lines; Steel Tie Rods, Computed Radiography, High Energy X-Rays; Betatron; Imaging Plate; Physical Copper and Lead Filters, Digital Image Processing.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2-1- MALHA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO BRASIL E NA REGIÃO NORDESTE. | 24 |
| FIGURA 2-2- FUNDAÇÃO TIPO SAPATA É LARGAMENTE UTILIZADA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO. | 27 |
| FIGURA 2-3- FOTOS MOSTRANDO QUE AS FUNDAÇÕES DE CONCRETO ARMADO PARA TORRES METÁLICAS AUTO-PORTANTES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO SÃO PREPARADAS NAS CONDIÇÕES LOCAIS. | 27 |
| FIGURA 2-4- CONSTRUÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 kV E EM OPERAÇÃO. OS CÍRCULOS EM VERMELHO MOSTRAM O LOCAL QUE POSSUI OS PARAFUSOS. | 29 |
| FIGURA 2-5- ISOLADORES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA: (A) ISOLADOR DE VIDRO, (B) ISOLADOR DE PORCELANA E (C) ISOLADOR DE COMPÓSITO. | 31 |
| FIGURA 2-6- CADEIA DE ISOLADORES DE VIDRO EM ANCORAGEM DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 230 kV. | 33 |
| FIGURA 2-7- ISOLADORES DE COMPÓSITO EM SUSPENSÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 230 kV. | 34 |
| FIGURA 2-8- INSPEÇÃO COM FOTOGRAFIA. | 35 |
| FIGURA 2-9- INSPEÇÃO COM BINÓCULO. | 36 |
| FIGURA 2-10- INSPEÇÃO POR DRONES. | 36 |
| FIGURA 2-11- PRINCÍPIO DA MEDIÇÃO DE GPR. | 39 |
| FIGURA 2-12- MODELO DE DESCRIÇÃO GERAL DOS SISTEMAS DIGITAIS DE RADIOGRAFIA. | 45 |
| FIGURA 2-13- AVALANCHE DE TOWNSEND. | 46 |
| FIGURA 2-14- CÂMARA DE IONIZAÇÃO DOS RAIOS-X. | 47 |
| FIGURA 2-15- LEI DO INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA PARA RAIOS-X. | 48 |
| FIGURA 2-16- ARRANJO EXPERIMENTAL PARA TESTE. | 48 |
| FIGURA 2-17- ESQUEMA DO ARRANJO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE INSPEÇÃO RADIOGRÁFICO DO ISOLADOR DE COMPÓSITO ENERGIZADO NO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO, ONDE A FONTE DE RAIOS-X (FRX) FOI POSICIONADA DE 0,6 M A 4 M. | 49 |
| FIGURA 2-18- OCORRÊNCIA DE CHAMAS NOS DETECTORES IP. | 50 |
| FIGURA 2-19- FORAM UTILIZADOS DOIS IPS SR (SUPER RESOLUTION) DISPOSTO UM ACIMA DO OUTRO COMO MOSTRADO NA FOTO DA ESQUERDA. EM VERMELHO ESTÁ DESTACADO O INCÊNDIO E EM AZUL OS INDÍCIOS DE TRILHAMENTO. NA FOTO DA DIREITA OBSERVA-SE O IP-2 QUE PEGOU FOGO E O SEU INVÓLUCRO. | 51 |
| FIGURA 2-20- DESCARGA ELÉTRICA NA PARTE DE CIMA DO IP MAIS PRÓXIMO À FASE. | 51 |
| FIGURA 2-21- TESTE SOBRE A RESISTÊNCIA COM O MULTÍMETRO NO IMAGING PLATE QUE PEGOU FOGO. | 52 |
| FIGURA 2-22- DOIS IPS UNIDOS FISICAMENTE USANDO POLICARBONATO RESULTANDO EM TORNO DE 85 CM DE COMPRIMENTO. | 52 |
| FIGURA 2-23- DOIS IPS UNIDOS FISICAMENTE E POSICIONADOS JUNTO AO ISOLADOR POLIMÉRICO COM FITA ADESIVA. | 53 |
| FIGURA 2-24- IMAGENS DE CONCRETO ARMADO EM DIFERENTES ESPESSURAS (DA ESQUERDA 300 MM, 600 MM E 800 MM). CAVIDADES COM TAMANHO DE $\varnothing 15$ MM, $\varnothing 20$ MM E $\varnothing 30$ MM PODEM SER VISTAS EM CADA IMAGEM. | 59 |
| FIGURA 2-25- CONCRETO ARMADO DE 1200 MM DE ESPESSURA COM TRÊS CAVIDADES DE TAMANHOS: $\varnothing 20$ MM COM PROFUNDIDADES DE 15 MM, 20 MM E 40 MM VISTAS DA DIREITA PARA A ESQUERDA. | 60 |
| FIGURA 2-26- FATOR DE DENSIDADE DE VAZIO PLOTADO EM FUNÇÃO DO TAMANHO DO VAZIO PARA 4 ESPESSURAS DIFERENTES DE CONCRETO. | 62 |
| FIGURA 2-27- (ESQUERDA) UMA FOTO DO TUBO DE RAIOS-X E (DIREITA) O RADIADOR DO BETATRON LOCALIZADO A 1 METRO DO TUBO DE RAIOS-X CONTENDO CHUMBO DENTRO PARA OBTENÇÃO DE UMA IMAGEM RADIOGRÁFICA COM RAIOS-X DE 7,5 MeV. | 64 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 2-28- OS ESQUEMAS DO TUBO DE RAIOS-X SÃO APRESENTADOS NA FIGURA 2-26. | 65 |
| FIGURA 2-29- RESULTADOS DA IMAGEM RADIOGRÁFICA DO TUBO DE RAIOS-X OBTIDA ORIGINALMENTE. | 67 |
| FIGURA 2-30- IMAGEM COLORIDA SINTÉTICA E SUA DECOMPOSIÇÃO EM BANDAS. (A) IMAGEM ORIGINAL EM ESCALA DE CINZA, CONFORME OBTIDA. (B) IMAGEM RGB GERADA COM BASE NA METODOLOGIA DE DAILY (1983). (C) BANDA R (VERMELHA). (D) BANDA G (VERDE). (E) BANDA B (AZUL). | 68 |
| FIGURA 2-31- IMAGEM ORIGINAL OBTIDA, IMAGEM COLORIDA SINTÉTICA E COMPONENTES PRINCIPAIS. (A) IMAGEM ORIGINAL, TAL COMO OBTIDA. (B) IMAGEM RGB SINTÉTICA. (C) IMAGEM RGB DOS COMPONENTES PRINCIPAIS (PC1PC2PC3). (D) PC1 (PRIMEIRO COMPONENTE PRINCIPAL). (E) PC2 (SEGUNDO COMPONENTE PRINCIPAL). (F) PC3 (TERCEIRO COMPONENTE PRINCIPAL). | 69 |
| FIGURA 2-32- AMPLIAÇÃO DA IMAGEM ORIGINAL OBTIDA, IMAGEM COLORIDA SINTÉTICA E COMPONENTES PRINCIPAIS. (A) IMAGEM ORIGINAL. (B) IMAGEM RGB SINTÉTICA. (C) IMAGEM PC1PC2PC3. (D) PC1. (E) PC2. (F) PC3. | 70 |
| FIGURA 2-33- FAIXA DE ESPESSURA DE CONCRETO ÓTIMO, APENAS POSSÍVEL E PROCESSAMENTO DE IMAGEM RECOMENDADO QUANDO INSPECIONADO COM DIFERENTES FONTES DE RADIAÇÃO. | 72 |
| FIGURA 2-34- PRIMEIRO BETATRON NO BRASIL, NO INSTITUTO DE FÍSICA DA USP – UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. | 73 |
| FIGURA 2-35- ESQUEMA DO INTERIOR DO BETATRON. | 74 |
| FIGURA 2-36- EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM O BETATRON E UMA TABELA DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS FORNECIDAS PELO FABRICANTE. | 75 |
| FIGURA 2-37- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA RADIOGRAFIA DE NÊUTRONS. | 77 |
| FIGURA 3-1- PRINCÍPIO DE RADIOGRAFIA POR MÉTODO DE ABSORÇÃO MANTIDO DESDE A DESCOBERTA DO RAIOS-X EM 1895. ENTRE UMA FONTE DE RADIAÇÃO IONIZANTE E DETETOR DE IMAGEM, FICA POSICIONADO O OBJETO DE INTERESSE COM UM CERTO VOLUME E ESPESSURA. | 82 |
| FIGURA 3-2- EFEITO DA RADIAÇÃO ESPALHADA. | 83 |
| FIGURA 3-3- PENUMBRA GERADA DE FOCO NA ORIGEM DA FONTE DE RADIAÇÃO É DE DIMENSÃO FINITA. PORTANTO, PARA AUMENTAR A CAPACIDADE DE RESOLUÇÃO DO SISTEMA RADIOGRÁFICO, AFASTAR A FONTE DE RADIAÇÃO DO OBJETO DE INTERESSE. | 85 |
| FIGURA 3-4- ABSORÇÃO FOTOELÉTRICA. | 88 |
| FIGURA 3-5- ESPALHAMENTO COMPTON. | 89 |
| FIGURA 3-6- ESPALHAMENTO COMPTON CONFORME A EQUAÇÃO ACIMA. | 90 |
| FIGURA 3-7- AS INTERAÇÕES PREDOMINANTES DO RAIOS-X COM A MATÉRIA EM FUNÇÃO DA ENERGIA DO RAIOS-X. ESPECIFICAMENTE COM RAIOS-X DE ALTA ENERGIA NA FAIXA DE 1 MeV E 10 MeV, A INTERAÇÃO PREDOMINANTE É O EFEITO COMPTON. | 90 |
| FIGURA 3-8- PRODUÇÃO DE PARES. | 91 |
| FIGURA 3-9- ESPALHAMENTO DE THOMSON. | 92 |
| FIGURA 3-10- FOTODESINTEGRAÇÃO. | 92 |
| FIGURA 3-11- MODELO DE ACCELERADOR LINEAR LINATRON 400 E SEUS COMPONENTES. | 104 |
| FIGURA 3-12- MODELO DE ACCELERADOR LINEAR LINATRON M3 E SEUS COMPONENTES. | 104 |
| FIGURA 3-13- CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO ACCELERADOR COM MAGNETRON E TUBO ACCELERADOR. | 105 |
| FIGURA 3-14- PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM BETATRON. | 108 |
| FIGURA 3-15- CAMADA DOS FILMES RADIOGRÁFICOS. | 109 |
| FIGURA 3-16- SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA PLACA TÍPICA DE IMAGEM DE FÓSFORO DE ARMAZENAMENTO. | 112 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 3-17- PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO DE PROCESSAMENTO DO USO DO IMAGING PLATE (IP): EXPOSIÇÃO, LEITURA, APAGAMENTO E REUSO. | 113 |
| FIGURA 3-18- PROCESSO FUNDAMENTAL DE AQUISIÇÃO E EXIBIÇÃO DE IMAGENS NA RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)..... | 113 |
| FIGURA 3-19- AVALIAÇÃO TOTAL DE PENUMBRA. | 114 |
| FIGURA 3-20- PROCESSO BÁSICO DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA | 115 |
| FIGURA 3-21- (A) TABELA DE CONSULTA LINEAR ORIGINAL DE 12 BITS / (B) VERSÃO GRÁFICA DA LUT LINEAR APLICADA. | 117 |
| FIGURA 3-22- SCANNER CR TÍPICO, ESTAÇÃO DE TRABALHO E PLACA DE IMAGEM. | 118 |
| FIGURA 3-23- (A) EXPOSIÇÃO VS. VALOR DE PIXEL / (B) QUALIDADE DE IMAGEM EPS VS. VALOR DE PIXEL. | 119 |
| FIGURA 3-24- EFEITOS DO RUÍDO NA QUALIDADE DA IMAGEM DIGITAL. | 120 |
| FIGURA 3-25- ILUSTRAÇÃO DE RUÍDO E NITIDEZ NO DETECTOR CR. | 121 |
| FIGURA 3-26- DETERMINANDO A RESOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE IMAGEM | 124 |
| FIGURA 3-27- DENSIDADE DE PIXELS E PROFUNDIDADE DE BITS VS. QUALIDADE DA IMAGEM | 125 |
| FIGURA 3-28- PASSOS NECESSÁRIOS PARA UMA MAIOR LINEARIDADE NA DIGITALIZAÇÃO DE IMAGENS. | 128 |
| FIGURA 3-29- IMAGEM DIGITAL TRANSMITIDA PELO CABO SUBMARINO NOS ANOS 20 ENTRE LONDRES E NOVA IORQUE. | 130 |
| FIGURA 3-30- IMAGEM DIGITAL TRANSMITIDA VIA CABO SUBMARINO, MAS REPRODUZIDA POR MÉTODO DE PERFURAÇÃO DE UMA FITA E UM EQUIPAMENTO..... | 130 |
| FIGURA 3-31- CONVENÇÃO DE COORDENADAS PARA REPRESENTAR UMA IMAGEM DIGITAL..... | 131 |
| FIGURA 3-32- REPRESENTAÇÃO DE UMA IMAGEM DIGITAL POR UMA COLEÇÃO DE PONTOS DISCRETOS EM UMA GRANDE RETANGULAR 3-D..... | 132 |
| FIGURA 3-33- PONTO DESTACADO SOBRE A IMAGEM E SUA MATRIZ DE PIXELS 10x10. | 133 |
| FIGURA 3-34- REPRESENTAÇÃO DE UMA IMAGEM DIGITAL COM (A) 3x4, (B) 12x16, (C) 48x64 E (D) 192x256 PIXELS. | 133 |
| FIGURA 3-35- REPRESENTAÇÃO DE UMA IMAGEM DIGITAL COM PROFUNDIDADES (A) 8, (B) 4 E (C) 2 BITS POR PIXEL. | 134 |
| FIGURA 3-36- ETAPAS DE UM SISTEMA DE PDI. | 135 |
| FIGURA 3-37- DUAS ABORDAGENS PARA SEGMENTAÇÃO. (A) IMAGEM ORIGINAL EM NÍVEIS DE CINZA. (B) IMAGEM SEGMENTADA ATRAVÉS DE UMA BINARIZAÇÃO. (C) IMAGEM SEGMENTADA POR DETECÇÃO DE BORDAS..... | 136 |
| FIGURA 3-38- ESTÁGIOS DE FORMAÇÃO DO CONTRASTE DA IMAGEM. | 140 |
| FIGURA 3-39- IQI DE FIO-DUPLA | 142 |
| FIGURA 3-40- DIMENSÕES DA ESTRUTURA DO IQI DUPLEX | 143 |
| FIGURA 3-41- RADIOGRAFIA DIGITAL DO IQI DUPLEX MOSTRANDO O ROI. | 145 |
| FIGURA 3-42- VALORES DE SENSIBILIDADE COM UM IQI DE GRAU/BURACO..... | 147 |
| FIGURA 3-43- ARRANJO TÍPICO DE BALIZAMENTO PARA REALIZAR RADIOGRAFIA NO CAMPO..... | 154 |
| FIGURA 4-1- EQUIPAMENTOS QUE COMPÕEM O BETATRON E UMA TABELA DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS FORNECIDAS PELO FABRICANTE. | 158 |
| FIGURA 4-2- SISTEMA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA DA DURR HD-CR 35 NDT. | 159 |
| FIGURA 4-3- TIJOLOS DE CHUMBO PARA BLINDAGEM EM CAIXAS. NO TOTAL FORAM ENTREGUES 8 CAIXAS. | 160 |
| FIGURA 4-4- PARTE DOS TIJOLOS DE CHUMBO MONTADOS NA FORMA DE PAREDE PARA REALIZAR OS ENSAIOS NO CRCN. | 161 |
| FIGURA 4-5- FANTOMAS COM VÁRIOS IQI'S..... | 162 |
| FIGURA 4-6- MONTAGEM DO EQUIPAMENTO. | 163 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 4-7- LEITOR DO FILME RADIOGRÁFICO IMAGING PLATE. | 163 |
| FIGURA 4-8- FILMES RADIOGRÁFICOS DE ALTA RESOLUÇÃO IMAGING PLATE..... | 164 |
| FIGURA 4-9- PARAFUSOS COM CORROSÃO UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS. | 164 |
| FIGURA 4-10- CHAPA DE COBRE DE 0,89 MM DE ESPESSURA..... | 169 |
| FIGURA 4-11- CHAPA DE CHUMBO DE 1 MM DE ESPESSURA. | 169 |
| FIGURA 4-12- ESQUEMAS DA FUNDAÇÃO EM SAPATA DA LINHA DE TRANSMISSÃO CAMPINA GRANDE II/ PAU FERRO. A UNIDADE DE COMPRIMENTO NA FIGURA ESQUEMÁTICO DA FIGURA À DIREITA É EM CM. | 171 |
| FIGURA 4-13- CAIXA PARA CONCRETAR A ARMADURA DE AÇO. | 171 |
| FIGURA 4-14- ARMADURA DE AÇO PARA SER CONCRETADO DENTRO DA CAIXA. | 172 |
| FIGURA 4-15- ARMADURA DE AÇO E NO INTERIOR COM CANTONEIRA EM “L” DE ABAS IGUAIS, DE DIMENSÃO SIMILAR DO “PÉ” DA TORRE METÁLICA AUTOPORTANTE, VAZIOS (TUBOS) E DEFEITOS (PERDA DE MASSA) INTRODUZIDOS NA ARMADURA PARA TENTAR VISUALIZAR ATRAVÉS DE RADIOGRAFIA DE ALTA ENERGIA. | 172 |
| FIGURA 4-16- NO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UFPE PARA PREPARAR O CONCRETO E PREENCHIMENTO DA CAIXA DE MADEIRA COM ARMADURA. | 173 |
| FIGURA 4-17- ARRANJO EXPERIMENTAL PARA RADIOGRAFIA CONCRETO ARMADO DE UMA FUNDAÇÃO DA TORRE METÁLICA AUTOPORTANTE..... | 173 |
| FIGURA 4-18- ESQUEMA DO ENSAIO RADIOGRÁFICO COM RAIOS-X DE ALTA ENERGIA. | 174 |
| FIGURA 4-19- ESQUEMA DE UMA TORRE DE CONCRETO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 KV. | 175 |
| FIGURA 4-20- CONSTRUÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 KV NO NORDESTE E EM OPERAÇÃO. OS CÍRCULOS MOSTRAM O LOCAL QUE POSSUI OS PARAFUSOS..... | 176 |
| FIGURA 4-21- ESQUEMA ADOTADO. | 176 |
| FIGURA 4-22- ESQUEMA DO ENSAIO SEM FILTRO COM 5 MeV, TEMPO DE 10 MIN E DISTÂNCIA FONTE/FILME DE 1 METRO. | 177 |
| FIGURA 4-23- ESQUEMA DO ENSAIO COM 5 MeV, TEMPO DE 10 MIN E DISTÂNCIA FONTE/FILME DE 1 M E FILTROS DE COBRE DE 0,89MM E DE CHUMBO DE 1MM. | 177 |
| FIGURA 4-24- FABRICAÇÃO DA ESTRUTURA DA CRUZETA. | 178 |
| FIGURA 4-25- PARAFUSO CORROÍDO NO LUGAR DO TIRANTE INCLINADO DE SUSTENTAÇÃO DA CRUZETA..... | 178 |
| FIGURA 4-26- ESQUEMA ADOTADO. | 179 |
| FIGURA 4-27- POSIÇÃO DO FILME. | 179 |
| FIGURA 4-28- ESQUEMA. | 180 |
| FIGURA 4-29- VISTA GERAL DA TORRE AUTOPORTANTE DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 230 KV CAMPINA GRANDE II / PAU FERRO, SELECIONADA PARA REALIZAR TESTES DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE ALTA ENERGIA UTILIZANDO O BETATRON. | 181 |
| FIGURA 4-30- ESQUEMA DA MONTAGEM DO SISTEMA RADIOGRÁFICO NA BASE DA TORRE. | 181 |
| FIGURA 4-31- MONTAGEM DO SISTEMA DE RADIOGRAFIA DIGITAL DE ALTA ENERGIA (BETATRON) MOVIDO COM GERADOR DE ELETRICIDADE COMPACTO VISANDO RADIOGRAFAR UMA ESTRUTURA DE CONCRETO..... | 182 |
| FIGURA 4-32- PARAFUSOS NA CRUZETA DE CONCRETO. | 183 |
| FIGURA 4-33- ESQUEMA ADOTADO. | 183 |
| FIGURA 4-34- ARRANJO EXPERIMENTAL PARA TESTE DE RADIOGRAFIA NO CAMPO – ALMOXARIFADO CHESF. | 184 |
| FIGURA 5-1- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE. | 186 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5-2- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE. | 187 |
| FIGURA 5-3- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE. | 188 |
| FIGURA 5-4- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE. | 190 |
| FIGURA 5-5- MEDIDOR GEIGER. | 191 |
| FIGURA 5-6- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE. | 192 |
| FIGURA 5-7- RADIOGRAFIA UTILIZANDO O FILTRO “ENHANCE DETAIL”..... | 193 |
| FIGURA 5-8- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 194 |
| FIGURA 5-9- RADIOGRAFIA UTILIZANDO FILTRO MATEMÁTICO: FILTRO DA MEDIANA E FILTRO DE REALCE DE DETALHES..... | 196 |
| FIGURA 5-10- IMAGEM RADIOGRÁFICA IM-50-06 OBTIDA COM RAIOS-X DIRETO+ESPALHADO E RAIOS-X E ESPALHADO..... | 196 |
| FIGURA 5-11- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 197 |
| FIGURA 5-12- RADIOGRAFIA OBTIDA UTILIZANDO O PROCESSAMENTO SOFTWARE ISee!. | 198 |
| FIGURA 5-13- IMAGEM RADIOGRÁFICA IM-50-11 OBTIDA COM RAIOS-X DIRETO+ESPALHADO E RAIOS-X E ESPALHADO..... | 198 |
| FIGURA 5-14- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 199 |
| FIGURA 5-15- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 200 |
| FIGURA 5-16- RADIOGRAFIA OBTIDA UTILIZANDO O PROCESSAMENTO SOFTWARE ISee!. | 201 |
| FIGURA 5-17- IMAGEM RADIOGRÁFICA IM-100-19 OBTIDA COM RAIOS-X DIRETO+ESPALHADO E RAIOS-X E ESPALHADO..... | 201 |
| FIGURA 5-18- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 202 |
| FIGURA 5-19- IMAGEM RADIOGRÁFICA OBTIDA UTILIZANDO O PROCESSAMENTO SOFTWARE ISee!. | 203 |
| FIGURA 5-20- IMAGEM RADIOGRÁFICA IM-100-22 OBTIDA COM RAIOS-X DIRETO+ESPALHADO E RAIOS-X E ESPALHADO..... | 204 |
| FIGURA 5-21- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 205 |
| FIGURA 5-22- RADIOGRAFIA VISUALIZADA APÓS A UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 205 |
| FIGURA 5-23- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 206 |
| FIGURA 5-24- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 207 |
| FIGURA 5-25- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 208 |
| FIGURA 5-26- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 210 |
| FIGURA 5-27- RADIOGRAFIA VISUALIZADA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 212 |
| FIGURA 5-28- RADIOGRAFIA VISUALIZADA UTILIZANDO COR INVERTIDA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS. | 212 |
| FIGURA 5-29- RADIOGRAFIA VISUALIZADA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 213 |
| FIGURA 5-30- RADIOGRAFIA VISUALIZADA UTILIZANDO COR INVERTIDA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS. | 213 |
| FIGURA 5-31- RADIOGRAFIA PROCESSADA UTILIZANDO DE FILTROS MATEMÁTICOS: FILTRO DA MEDIANA E O FILTRO DE REALCE DE DETALHES. | 214 |
| FIGURA 5-32- RADIOGRAFIA VISUALIZADA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 215 |
| FIGURA 5-33- RADIOGRAFIA VISUALIZADA UTILIZANDO COR NEGATIVA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 215 |
| FIGURA 5-34- RADIOGRAFIA VISUALIZADA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 216 |
| FIGURA 5-35- RADIOGRAFIA VISUALIZADA UTILIZANDO COR NEGATIVA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 216 |
| FIGURA 5-36- RADIOGRAFIA VISUALIZADA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 217 |
| FIGURA 5-37- RADIOGRAFIA VISUALIZADA UTILIZANDO COR NEGATIVA SEM UTILIZAÇÃO DE FILTROS MATEMÁTICOS..... | 217 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 5-38- RADIOGRAFIA PROCESSADA UTILIZANDO DE FILTROS MATEMÁTICOS: FILTRO DA MEDIANA E O FILTRO DE REALCE DE DETALHES. | 218 |
| FIGURA 5-39- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 218 |
| FIGURA 5-40- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 220 |
| FIGURA 5-41- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 221 |
| FIGURA 5-42- ESTRUTURA PARA CONCRETO ARMADO COM DEFEITOS GERADOS. DIMENSÃO: 60 CM X 60 CM. | 222 |
| FIGURA 5-43- RADIOGRAFIA COMO FOI OBTIDA. | 223 |
| FIGURA 5-44- RADIOGRAFIA NEGATIVA DA FIGURA ACIMA | 223 |
| FIGURA 5-45- IMAGEM RADIOGRÁFICA POSITIVA PROCESSADA COM FILTRO PSEUDO PLAST. | 224 |
| FIGURA 5-46- IMAGEM RADIOGRÁFICA NEGATIVA PROCESSADA COM FILTRO PSEUDO PLAST. | 224 |
| FIGURA 5-47- IMAGEM RADIOGRÁFICA POSITIVA PROCESSADA COM FILTRO ADAPTIVE DETAILS ISOTROPIC. | 225 |
| FIGURA 5-48- IMAGEM RADIOGRÁFICA NEGATIVA PROCESSADA COM FILTRO ADAPTIVE DETAILS ISOTROPIC..... | 225 |
| FIGURA 5-49- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 227 |
| FIGURA 5-50- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 228 |
| FIGURA 5-51- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 230 |
| FIGURA 5-52- IMAGING PLATE DA DURR DE 35 CM X 43 CM..... | 231 |
| FIGURA 5-53- IMAGING PLATE DA FUJIFILM DE 18 CM X 24 CM..... | 231 |
| FIGURA 5-54- PERKIN-ELMER 12,5 CM X 43 CM. | 231 |
| FIGURA 5-55- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 232 |
| FIGURA 5-56- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 233 |
| FIGURA 5-57- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 233 |
| FIGURA 5-58- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 234 |
| FIGURA 5-59- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 234 |
| FIGURA 5-60- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 235 |
| FIGURA 5-61- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 235 |
| FIGURA 5-62- PARÂMETROS UTILIZADOS COM IMAGEM OBTIDA CORRESPONDENTE | 237 |
| FIGURA 5-63- MONTAGEM PARA PROCEDIMENTO DO SISTEMA DE RADIOGRAFIA DIGITAL DE ALTA ENERGIA POR OUTRO ÂNGULO. . | 238 |
| FIGURA 5-64- ESQUEMA ADOTADO PARA RADIOGRAFIA DA FUNDAÇÃO DA BASE DA TORRE 31-2 PAU FERRO EM CAMPINA GRANDE. | 239 |
| FIGURA 5-65- POSICIONAMENTO DO IMAGING PLATE..... | 240 |
| FIGURA 5-66- DISPOSITIVO SOBREPOSTO À OUTRA FUNDAÇÃO DA BASE DA MESMA TORRE..... | 240 |
| FIGURA 5-67- DISPOSITIVO..... | 241 |
| FIGURA 5-68- LEITOR DE IMAGING PLATE..... | 241 |
| FIGURA 5-69- WORKSTATION PARA ARMAZENAMENTO DE DADOS..... | 242 |
| FIGURA 5-70- DISPOSIÇÃO DO SISTEMA RADIOGRÁFICO..... | 242 |
| FIGURA 5-71- DISPOSITIVO PARA ACIONAMENTO DA FONTE DE RAIOS-X E O DETECTOR GEIGER. | 243 |
| FIGURA 5-72- DISPOSITIVO..... | 243 |
| FIGURA 5-73- GERADOR DE ELETRICIDADE COM POTÊNCIA MÁXIMA DE 5.1 kVA..... | 243 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| GRÁFICO 2-1- MATRIZ PARA GERAÇÃO DE ENERGIA NO MUNDO, GRÁFICO À ESQUERDA E NO BRASIL, GRÁFICO À DIREITA. | 23 |
| GRÁFICO 2-2- ENERGIA RENOVÁVEL E NÃO RENOVÁVEL NO BRASIL E NO MUNDO. | 24 |
| GRÁFICO 3-1- APROXIMAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO TOTAL (μ), EM VERMELHO, PARA O FERRO EM FUNÇÃO DA ENERGIA DA RADIAÇÃO E EM PRETO ESTÃO AS QUATRO INTERAÇÕES RADIAÇÃO-MATÉRIA. | 87 |
| GRÁFICO 3-2- DADOS DE EXPOSIÇÃO PARA RAIOS-X DE 8 MV: DISTÂNCIA DA FONTE AO FILME DE 1 m; FILME MX, DENSIDADE 2,0; TELAS INTENSIFICADORAS DE COBRE, FRENTE DE 1,5 mm, VERSO DE 0,25 mm. | 95 |
| GRÁFICO 3-3- COMPARAÇÃO DE DIFERENTES FONTES. | 106 |
| GRÁFICO 3-4- MOSTRA A EXCEPCIONAL SENSITIVIDADE DO IMAGING PLATE (IP) DE DUAS A TRÊS ORDENS SUPERIORES QUE NO FILME DE RAIOS-X E A LINEARIDADE (FAIXA DINÂMICA) EM COMPARAÇÃO COM O FILME DE RAIOS-X. | 111 |
| GRÁFICO 3-5- GRÁFICO FORMANDO A FUNÇÃO DE EXPANSÃO DE ARESTA CURVA USANDO IQI DUPLEX. | 145 |
| GRÁFICO 3-6- EXEMPLO DE CARTA DE EXPOSIÇÃO COM BETATRON OPERANDO A 6,0 MeV E 7,5 MeV. TEMPO DE EXPOSIÇÃO EM FUNÇÃO A ESPESSURA, PARA CASO DE FILMES DE RAIOS-X CONVENCIONAL DA AGFA D7, D4 E KODAK PM-X PARA OBTENÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS DE CONCRETO COM QUALIDADE. | 154 |
| GRÁFICO 4-1- ESPECTRO DO FEIXE MONOCROMÁTICO DE BETATRON. | 157 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 2-1- ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE CONCRETO - PONTO DE INTERESSE/TIPO DE DANO | 56 |
| TABELA 2-2- ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS DE CONCRETO - MÉTODOS DE ENSAIOS. | 57 |
| TABELA 2-3- TEMPOS DE EXPOSIÇÃO PARA FILME E PLACA DE IMAGEM, INCLUINDO O TEMPO DE RESFRIAMENTO PARA O BETATRON EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO CONCRETO ARMADO. | 60 |
| TABELA 2-4- FONTES DE RADIAÇÃO PARA DIFERENTES ESPESSURAS DE CONCRETO | 71 |
| TABELA 2-5- ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE BETATRONS..... | 75 |
| TABELA 3-1- TELAS DE INTENSIFICAÇÃO PARA USO COM RADIAÇÃO X DE MEGAVOLTAGEM. | 96 |
| TABELA 3-2- TAMANHOS DE CAMPO EM DIFERENTES ENERGIAS DE RAIOS-X, ASSUMINDO UM FEIXE DE ELÉTRONS PARALELO | 102 |
| TABELA 3-3- DADOS CARACTERÍSTICOS DAS FONTES DE COBALTO-60 | 103 |
| TABELA 3-4- ESPESSURA DAS TELAS INTENSIFICADORAS DE CHUMBO USADAS COM RAIOS GAMA E RAIOS X DE ACELERADORES LINEARES (8 MeV) | 106 |
| TABELA 3-5- CARACTERÍSTICA DO BETATRON DE 7,5 MeV. | 107 |
| TABELA 3-6- PARÂMETROS DO INDICADOR DE QUALIDADE DO IQI DUPLEX..... | 144 |
| TABELA 3-7- VALORES DE SENSIBILIDADE IQI ATINGÍVEIS EM AÇO | 147 |
| TABELA 3-8- VALORES CALCULADOS DE SENSIBILIDADE IQI | 151 |
| TABELA 3-9- PARÂMETROS ENVOLVIDOS NA DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TEMPO DE EXPOSIÇÃO. | 155 |
| TABELA 4-1- IMAGING PLATES UTILIZADOS..... | 170 |
| TABELA 5-1- PARÂMETROS DA IRRADIAÇÃO UTILIZANDO FILTRO DE COBRE. | 185 |
| TABELA 5-2- PARÂMETROS DA IRRADIAÇÃO UTILIZANDO FILTRO DE CHUMBO. | 185 |
| TABELA 5-3- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO COM DISTÂNCIA ENTRE A FONTE E O FILME DE 1 METRO. | 192 |
| TABELA 5-4- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 194 |
| TABELA 5-5- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO DISTÂNCIA DE 1,5 ENTRE A FONTE E O OBJETO. | 197 |
| TABELA 5-6- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 199 |
| TABELA 5-7- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO | 200 |
| TABELA 5-8- ENERGIA E TEMPO DE EXPOSIÇÃO. | 202 |
| TABELA 5-9- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 205 |
| TABELA 5-10- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 206 |
| TABELA 5-11- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 207 |
| TABELA 5-12- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 208 |
| TABELA 5-13- PARÂMETROS RADIOGRÁFICOS | 210 |
| TABELA 5-14- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 211 |
| TABELA 5-15- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 214 |
| TABELA 5-16- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 218 |
| TABELA 5-17- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 227 |
| TABELA 5-18- PARÂMETROS DA IRRADIAÇÃO..... | 228 |
| TABELA 5-19- PARÂMETROS DA IRRADIAÇÃO..... | 230 |
| TABELA 5-20- PARÂMETROS DE IRRADIAÇÃO..... | 232 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ONS | Operador Nacional de Sistema Elétrico: é o responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país. |
| PVI | Parcela Variável por Indisponibilidade: é um mecanismo regulatório no setor de transmissão de energia elétrica no Brasil. Ela representa um valor que é descontado da Receita Anual Permitida (RAP) das empresas transmissoras quando suas instalações (linhas de transmissão, subestações, etc.) ficam indisponíveis, seja por desligamentos programados ou não programados. |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica: tem como principal papel regular e fiscalizar o setor de energia elétrica no Brasil. |
| PNE 2050 | Plano Nacional de Energia de Longo Prazo. |
| MeV | Megaelétron-volt. É uma unidade de medida de energia utilizada principalmente em física nuclear e de partículas. |
| kV | Quilovolt (kV): é uma unidade de medida de tensão elétrica (também conhecida como diferença de potencial elétrico). |
| IQI | Indicadores de Qualidade de Imagem do tipo fio: utilizados em radiografia industrial (um tipo de ensaio não destrutivo). |
| Ci | Curie (Ci): é uma unidade de medida de atividade radioativa. Ela quantifica a taxa na qual um material radioativo se desintegra (emite partículas ou radiação). |
| Hz | Hertz: é a abreviação de que é a unidade de medida de frequência no Sistema Internacional de Unidades (SI). Ela representa o número de ciclos de um evento periódico que ocorrem em um segundo. |

| | |
|--|---|
| IP | Imaging Plate: é um tipo de detector reutilizável semelhante a um filme, usado em uma técnica de radiografia digital chamada Radiografia Computadorizada. |
| BaFBr:Eu ²⁺ | Fluorobrometo de Bário dopado com Európio: É um componente crucial das placas de imagem de fósforo fotoestimulável (PSP) utilizadas em Radiografia Computadorizada (RC). |
| µm | Micrômetro: é uma unidade de comprimento no sistema métrico equivalente a um milionésimo (1/1.000.000) de metros. |
| Norma da ASTM E2007-10 (reaprovado em 2023) | ASTM E2007-10: é a "Standard Guide for Computed Radiography" (Guia Padrão para Radiografia Computadorizada) publicada pela ASTM International. |
| OSL - <i>Optical Stimulated Luminescence</i> | Luminescência estimulada óptica: é um fenômeno e uma técnica usada em vários campos científicos, principalmente para dosimetria de radiação e datação de materiais. |
| nm | Nanômetro: é uma unidade de comprimento no sistema métrico igual a um bilionésimo (1/1.000.000.000) de um metro. |
| He-Ne | Hélio-Neônio: é um feixe de luz coerente e monocromática produzido por um laser de hélio-neônio. |
| PMT | Tubo fotomultiplicador: é um tipo de detector de luz extremamente sensível capaz de detectar fótons individuais de luz. Ele funciona convertendo a luz recebida em um sinal elétrico amplificado. |
| ADC | Analog-to-Digital Converter: conversor ADC, também conhecido como conversor analógico-digital (CAD), é um circuito eletrônico que converte um sinal analógico contínuo (como tensão, corrente, temperatura, pressão, etc) em um sinal digital discreto. |
| ISO | International Organization for Standardization |

| | |
|--------------|--|
| Norma EM-444 | é a norma europeia EN 444:1994, intitulada "Ensaaios não destrutivos - Princípios gerais para o exame radiográfico de materiais metálicos por raios X e gama" |
| EN | European Norm |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear: é uma autarquia federal brasileira, vinculada ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), responsável pela normatização, licenciamento, fiscalização e regulação das atividades relacionadas à energia nuclear no Brasil. |
| CRCN | Centro Regional de Ciências Nucleares. |
| CR | Radiografia computadorizada: é uma técnica de radiografia digital na qual uma placa revestida com um material fotossensível chamada placa de imagem (Imaging Plate - IP), é utilizada no lugar do filme radiográfico tradicional. |
| ROI | Região de interesse: no contexto de processamento de imagens é uma área específica dentro de uma imagem que é selecionada para análise ou processamento adicional. Em vez de analisar ou processar toda a imagem, o foco é direcionado para essa região particular que contém informações relevantes para a tarefa em questão. |
| CHESF | Companhia Hidroelétrica do São Francisco. |
| MPa | Megapascal: é uma unidade de medida de pressão e tensão no Sistema Internacional de Unidades (SI). |
| HSV | O espaço de cores HSV (Matiz, Saturação, Valor) é um modelo que descreve cores com base em três componentes. |
| RGB | O espaço de cores RGB é um modelo de cores aditivo no qual as cores primárias vermelho (Red), verde (Green) e azul (Blue) são combinadas em várias proporções para produzir uma vasta gama de cores. |
| mSv | Milisievert é uma unidade de medida de dose equivalente de radiação ionizante. O Sievert (Sv) é a unidade padrão do Sistema Internacional de Unidades (SI) para dose |

equivalente, e o millisievert é um submúltiplo, equivalente a 1/1000 de um Sievert. A dose equivalente leva em consideração o tipo de radiação e sua eficácia biológica relativa ao causar danos em tecidos vivos.

μSv (Microsievert) é uma unidade de medida de dose equivalente de radiação ionizante. O Sievert (Sv) é a unidade padrão do Sistema Internacional de Unidades (SI) para dose equivalente, e o microsievert é um submúltiplo, equivalente a um milionésimo (1/1.000.000) de um Sievert. Assim como o millisievert, o microsievert leva em consideração o tipo de radiação e sua eficácia biológica relativa ao causar danos em tecidos vivos.

Cu Cobre

Pb Chumbo

EPE Empresa de Pesquisa Energética

IAEA *International Atomic Energy Agency*

HEDRAD *High Energy Digital Radiography*: refere-se a uma técnica radiográfica que utiliza raios X de alta energia (tipicamente acima de 1 MeV) em conjunto com detectores digitais para produzir imagens.

LINAC *Linear Accelerator*: Este tipo de dispositivo tem diversas aplicações importantes, principalmente na medicina e na pesquisa.

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1 | 17 |
| INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 Objetivos da Tese de Doutorado | 19 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 19 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 20 |
| 1.2 Estruturação da Tese | 20 |
| Capítulo 2 | 23 |
| REVISÃO DE LITERATURAS | 23 |
| 2.1 Uso de Concreto Armado em Linhas de Transmissão de Alta e Extra-alta Tensão..... | 23 |
| 2.2 Isoladores Elétricos para Linhas de Transmissão | 31 |
| 2.3 Inspeção Não Destrutiva e Monitoramento de Linhas de Transmissão | 34 |
| 2.2.1 Técnicas de ensaios não destrutivos atualmente empregados | 34 |
| 2.3 Ocorrência de descarga elétrica devido ao efeito combinado do campo elétrico e da ionização do ar pelo raios-X..... | 45 |
| 2.4 Inspeção não destrutiva de concreto | 54 |
| 2.5 Processamento de imagens radiográficas de concreto | 58 |
| 2.6 Processamento de imagens digitais usando metodologia de coloração sintética..... | 63 |
| 2.7 Radiografia de Alta Energia para Inspeção de Estrutura de Concreto Armado..... | 71 |
| 2.8 Projeto HEDRAD para Desenvolvimento de Sistemas e Procedimentos de Radiografia Computadorizada | 79 |
| Capítulo 3 | 81 |
| FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 81 |
| 3.1 Processo Radiográfico | 81 |

| | |
|---|------------|
| 3.1.1 Interação da Radiação com a Matéria..... | 86 |
| 3.1.2 Mecanismos que Causam Atenuação de um Feixe de Raios-X..... | 87 |
| 3.1.3 Radiografia de alta energia | 92 |
| 3.2 Fontes de Radiação de Alta Energia | 98 |
| 3.2.1 Tipos de Equipamentos de raio-X de Alta Energia..... | 98 |
| 3.2.2 Fonte de radiação gama..... | 103 |
| 3.2.3 Aceleradores lineares..... | 103 |
| 3.2.4 Características da fonte de raios-X de alta energia de Betatron | 105 |
| 3.3 Filmes radiográficos convencionais | 108 |
| 3.4 Radiografia Computadorizada | 110 |
| 3.4.1 Fundamentos do Detetor de Imagem Digital “Imaging Plate” | 110 |
| 3.4.2 Radiografia Computadorizada (CR) | 114 |
| 3.4.3 Imagem Radiográfica Digital | 126 |
| 3.5 Processamento de imagens Radiográfica Digital | 129 |
| 3.5.1 Avaliação da Qualidade de Imagem Radiográfica com Raios-X de Alta Energia Utilizando IQI de Fio-duplo..... | 142 |
| 3.6 Adequação do Laboratório para Operar Betatron de 7,5 MeV para Ensaios Radiográficos de Estruturas de Concreto Armado | 153 |
| Capítulo 4 | 156 |
| MATERIAIS E MÉTODOS | 156 |
| 4.1 Estudo para especificação do gerador de emissão de radiação de alta energia | 157 |
| 4.2 Especificação e aquisição de um sistema completo de kit de coleta digital de imagens radiográficas. | 159 |
| 4.3 Adequação do Laboratório..... | 160 |
| 4.4 Avaliação da Qualidade de Imagem Radiográfica com Raios-X de alta Energia Utilizando IQI de Fio-duplo do Sistema Betatron e Imaging Plate | 161 |

| | |
|--|------------|
| 4.5 Arranjo dos Testes Radiográficos do Concreto sem Reforço com Espessura de 200 mm a 1500 mm para Determinação de Parâmetros Radiográficos com Raios X de Alta Energia para avaliar o poder de penetração. | 162 |
| 4.6 Uso de Filtros Físicos de Cobre e Chumbo para Redução do Efeito do Espalhamento de Raios-X devido ao Efeito Compton Visando Imagem Radiográfica de Alta Qualidade | 169 |
| 4.7 Processamento de Imagens Digitais com Softwares Comerciais e Dedicados para Realçar Regiões de Interesse (ROI) | 170 |
| 4.8 Testes Radiográficos com Raios-X de Alta Energia com Imaging Plate de Diferentes Fabricantes | 170 |
| 4.9 Preparação para Testes Radiográficos da Fundação de Concreto Armado de uma Torre Metálica Autoportante de Linha de Transmissão de 230 kV | 170 |
| 4.10 Preparação para testes Radiográficos dos Tirantes no Interior de uma Torre de Concreto de Linha de Transmissão de 500 kV | 174 |
| 4.11 Locais de Testes em Campo para Validar os Parâmetros Radiográficos Obtidos em Testes Laboratoriais | 180 |
| Capítulo 5 | 185 |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES | 185 |
| 5.1 Uso de IQI de Fio-duplo para Avaliação da Resolução Espacial dos Sistema Radiográfico Digital de Alta Energia | 185 |
| 5.2 Testes de Poder de Penetração do Raios-X de Alta Energia em Concreto sem Reforço de 200 mm até 1500 mm de Espessura com Sistema Radiográfico Computadorizado | 191 |
| 5.3 Ensaios Radiográficos da Fundação de Concreto Armado de uma Torre Metálica Autoportante de Linha de Transmissão de 230 kV | 222 |
| 5.4 Inspeção dos Tirantes no Interior de uma Torre de Concreto de Linha de Transmissão de 500 kV – Testes Utilizando Imaging Plate de Diferentes Fabricantes Combinados com Filtros Físicos de Cobre e Chumbo | 226 |

| | |
|---|------------|
| 5.5 Inspeção dos Tirantes no Interior de uma Torre de Concreto de Linha de Transmissão de 500 kV..... | 232 |
| 5.6 Testes em Campo com Sistema Radiográfico Digital de Alta Energia para Validar os Parâmetros Radiográficos Obtidos no Laboratório | 238 |
| 5.6.1. Fundação de Concreto Armado da Torre de 230kV da linha Campina Grande/Pau Ferro | 238 |
| 5.6.2. Almoxarifado da CHESF em Abreu e Lima | 242 |
| Capítulo 6 | 245 |
| CONCLUSÕES | 245 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 247 |
| REFERÊNCIAS..... | 249 |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

No mundo moderno a demanda por energia elétrica é crescente, mas devido à ocorrência do aquecimento global, a sua geração deve ser realizada principalmente com redução de emissão de gases de efeito estufa tais como dióxido de carbono (CO_2) para atmosfera, principalmente através do uso de energias renováveis. Segundo a PNE 2050, o planejamento de longo prazo da energia no Brasil funciona como um grande projeto para garantir que o país tenha eletricidade suficiente no futuro, de forma econômica, confiável e sustentável. Como o Brasil é uma nação em desenvolvimento, com um crescimento econômico (PIB) projetado em 3,1% ao ano até 2050, a demanda por energia elétrica deve crescer na mesma proporção. Para atender a essa necessidade crescente, é preciso decidir estrategicamente quais fontes de energia - sejam renováveis, como sol, vento e água, ou não renováveis - serão utilizadas, levando em conta que o país possui uma vasta área geográfica e uma grande variedade de recursos energéticos distribuídos por todo o seu território. Independentemente de como a energia elétrica é gerada, precisa ser transmitida do local de geração até o local de consumo, e isto é realizado através de linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão. De acordo com a Operadora Nacional de Sistema Elétrico (ONS, 2019), as linhas de transmissão de energia elétrica de alta e extra-alta tensão no Brasil operam com as tensões de 138 kV, 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 750 kV e a implementação da Parcela Variável por Indisponibilidade pela Agência Nacional de Energia Elétrica (PVI/ANEEL) em 2007 as concessionárias responsáveis pela transmissão de energia elétrica devem buscar manter que as suas linhas de transmissão estejam sempre disponíveis para transmissão, caso contrário, uma espécie de multa é aplicada pela ONS/ANEEL por cada minuto indisponível (ONS, 2019; ANEEL, 2007). Por exemplo, se uma linha de transmissão de extra-alta tensão de 500 kV ficar indisponível por desligamento não programado, tal como em caso de queda de cabos condutores ao chão, uma penalidade de R\$40 mil por minuto é aplicada à concessionária por indisponibilidade devido ao desligamento não programado (ONS, 2019). Dependendo do tempo de parada ou indisponibilidade da linha de transmissão, a concessionária pode perder o faturamento do mês.

O sistema de linhas de transmissão, que inclui equipamentos de subestações, no Brasil, dependendo da concessionária, está em operação há mais de 30 anos e tem uma parte do sistema mais antigo que já opera há mais de 50 anos. Esses sistemas de transmissão possuem estruturas de concreto de grande dimensão reforçado ou não com aço para dar rigidez à estrutura, tais como base das torres metálicas de transmissão, base de fixação das torres através de cabos de "estaiamento" e outras bases. Em função do longo período de operação, as estruturas de concreto podem apresentar fissuras, degradação dos reforços de aço devido à corrosão em armaduras e *stub* (cantoneira do pé da torre que fica no interior da fundação de concreto armado feito *in-loco*), ou presença de vazios introduzidos durante o processo de fabricação da estrutura *in-loco* que pode variar consideravelmente durante o processo de construção. O sucesso da concretagem de uma fundação com armadura pode não ser atingido nesse estágio, devido a fatores imprevisíveis. Tais defeitos são inspecionados por ensaios não destrutivos visando avaliar a integridade estrutural de grandes bases de estruturas em concreto, parafusos de cadeias de isoladores e no interior de cruzetas de concreto das torres preferencialmente sem a necessidade de desligar a linha de transmissão, e dos equipamentos de médio a grande porte das subestações.

Diante desse cenário, o presente trabalho de pesquisa teve como objetivo desenvolver de forma sistemática, um estudo nos laboratórios do Campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em Recife, Pernambuco, sobre desenvolvimento de um sistema radiográfico digital de alta energia para avaliar a integridade estrutural das estruturas de concreto armado, assim como das ferragens de aço no interior de torres de concreto utilizadas nas linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão. Através do sistema radiográfico de alta energia proposto, visou-se obter imagens radiográficas de alta resolução espacial. O sistema de radiografia digital com raios-X de alta energia gerado por betatron, em combinação com um detector *off-line* de alta sensibilidade e resolução denominado de *Imaging Plate*, e uso de um escâner de alta resolução para obter imagens radiográficas de alta qualidade e resolução permitiram inspecionar a integridade estrutural de estruturas de concreto armado com dimensão acima de 200 mm de espessura com e sem reforço de aço com espessura de até 1.500 mm das linhas de transmissão e, equipamentos de porte

médio de subestações que possuam uma estrutura equivalente a uma espessura de 400 mm de aço.

Especificamente, visando avaliar a integridade estrutural de estruturas de concreto armado com vergalhões, utilizando uma fonte de raios-X de até 7,5 MeV chaveável denominado de betatron, em parafusos de fixação de cadeias de isoladores e no interior das cruzetas das torres de concreto sem desligar a linha de transmissão. Avaliou-se também o uso dos equipamentos de médio a grande porte tais como isoladores de pedestal, para-raios, transformador de corrente, colunas de isoladores localizadas nas subestações, realizando-se trabalhos contínuos e sistemáticos de pesquisa nos laboratórios da universidade para determinar os parâmetros radiográficos para obtenção de imagens radiográficas com alta resolução e qualidade, que possibilitassem a visualização de falhas tais como trincas, bolhas de ar, perda de massa devido à corrosão no interior de grandes estruturas para que se possa tomar decisões sobre os procedimentos de manutenção preditiva.

1.1 Objetivos da Tese de Doutorado

A seguir, são apresentados os objetivos gerais e específicos relacionados ao desenvolvimento de estudos de inspeção e monitoramento voltados à avaliação da integridade estrutural do concreto armado e das ferragens de aço no interior de concreto armado, utilizados em linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, por meio de um sistema de radiografia computadorizada de alta energia proposto.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e estabelecer um sistema de radiografia digital de alta energia e alta resolução espacial visando inspeção interna da estrutura de concreto armado reforçado com vergalhões, monitoramento da integridade dos tirantes de aço utilizados nas linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um sistema de radiografia digital de alta energia e alta resolução espacial visando inspeção e monitoramento dos tirantes, stub e ferragens de aço no interior do concreto armado de linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV,
- Realizar testes de resolução espacial do sistema radiográfico digital utilizando IQI de fio-duplo e filtros físicos de cobre e chumbo, e processamento de imagem digital,
- Adequar o laboratório para testes com sistema radiográfico de alta energia com raios-X de até 7,5 MeV do ponto de vista de proteção radiológica,
- Realizar testes para avaliar o poder de penetração do raios-X de 7,5 MeV em estruturas de concreto com espessura de até 1.500 mm,
- Realizar ensaios em estruturas de concreto armado com dimensão de 200 mm X 200 mm e 600 mm X 600 mm com ferragens (tirantes, stub) no interior do concreto armado,
- Com parâmetros radiográficos obtidos em laboratório, realizar ensaios radiográficos em campo com sistema radiográfico digital de alta energia desenvolvido.
- Testar o sistema radiográfico digital de alta energia utilizando detector de imagem radiográfica de alta sensibilidade e alta resolução denominado de Imaging Plate (IP).

1.2 Estruturação da Tese

A presente tese está organizada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas. A seguir, além deste capítulo de introdução, um resumo do conteúdo presente em cada capítulo.

- ❖ O capítulo 1 apresenta a problemática, ressaltando a necessidade de inspecionar e monitorar a integridade de fundações de torres metálicas autoportantes de linhas de transmissão de 230 kV e do estado de tirante metálica no interior da torre de concreto de linhas de transmissão de 500 kV.

Também são apresentados o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura da tese.

- ❖ O capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica, abordando o uso de concreto armado em linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, isoladores elétricos para linhas de transmissão, radiologia digital, processamento de imagens, microtomografia computadorizada, utilização da radiografia para inspeção de estrutura de concreto armado, e o desenvolvimento de sistemas de radiografia computadorizada.
- ❖ O capítulo 3 aborda a fundamentação teórica quanto ao processo radiográfico, fontes de radiação de alta energia, técnicas e processamento de imagem radiográfica, adequação do laboratório para operar realização de ensaios e o efeito da ionização do ar induzida pelos raios-X.
- ❖ O capítulo 4 apresenta em detalhes os materiais e métodos empregados no desenvolvimento da pesquisa. São destacados o uso de filtros físicos de cobre e chumbo para otimização da qualidade da imagem e a aplicação de indicadores de qualidade de imagem (IQI) de fio-duplo para avaliação da resolução espacial do sistema. Bem como a preparação dos corpos de prova de concreto armado, com dimensões representativas das estruturas reais encontradas em campo, incluindo blocos com e sem reforço metálico. Além disso, são descritos os ensaios preliminares realizados em campo, que tiveram como objetivo validar os parâmetros radiográficos previamente definidos em laboratório. Por fim, são apresentados os recursos complementares utilizados, como filtros matemáticos para o processamento digital das imagens.
- ❖ O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões dos ensaios radiográficos laboratoriais utilizando raios-X de alta energia e *Imaging Plate* de diferentes fabricantes e do emprego dos filtros de cobre e chumbo para concretos sem reforço de até 1500 mm de espessura, tirante de torre de concreto de linha de transmissão de 500 kV e fundação de torre autoportante de linha de transmissão de 230kV.

- ❖ O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.
- ❖ Referências Bibliográficas.

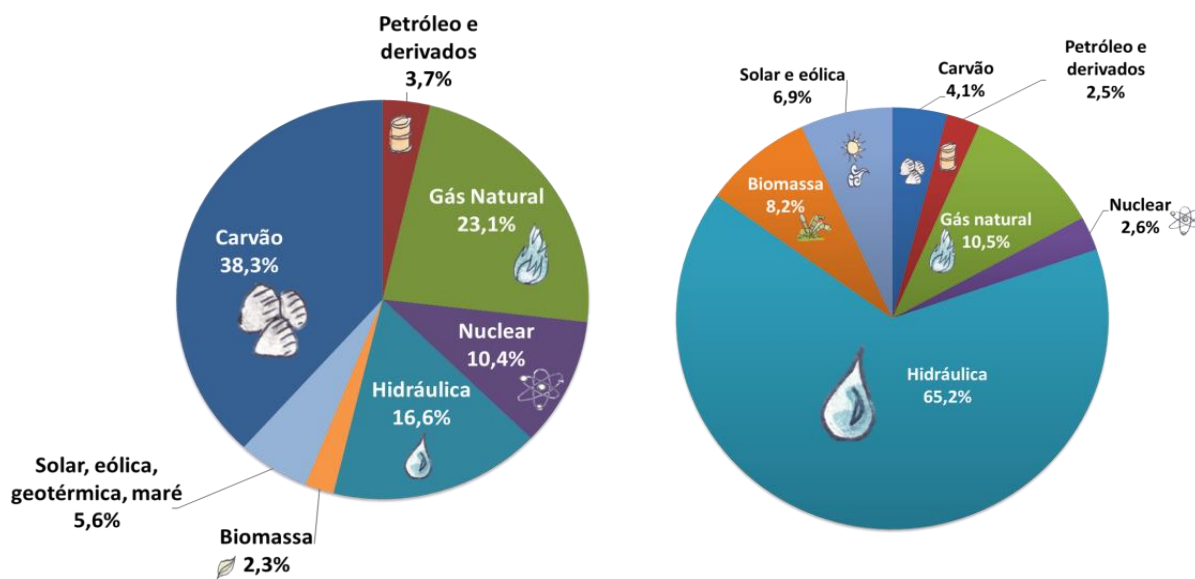
Capítulo 2

REVISÃO DE LITERATURAS

2.1 Uso de Concreto Armado em Linhas de Transmissão de Alta e Extra-alta Tensão

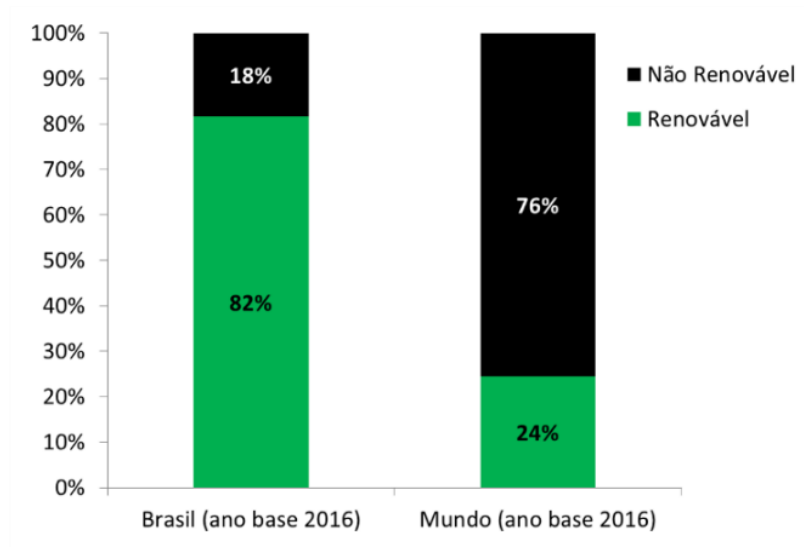
Na atualidade, existem várias modalidades de geração de energia elétrica. Com respeito à matriz energética em termos de energia elétrica no Brasil, a sua geração está distribuída como mostra o Gráfico 2-1 no mundo e no Brasil. No mundo, a energia elétrica é gerada principalmente pelo uso de combustíveis de origem fósseis tais como carvão, óleo e gás natural, em termelétricas, que corresponde à mais de 80%.

Gráfico 2-1- Matriz para geração de energia no mundo, gráfico à esquerda e no Brasil, gráfico à direita.



Fonte: EPE (2019).

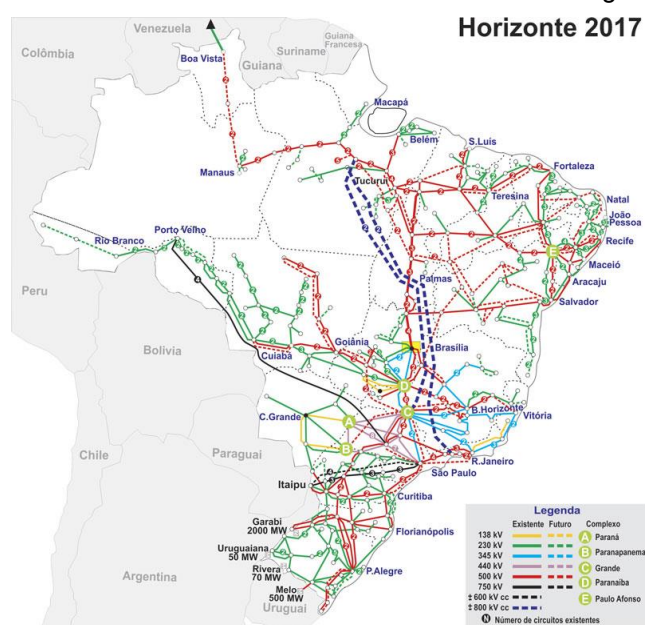
Gráfico 2-2- Energia renovável e não renovável no Brasil e no mundo.



Fonte: EPE (2019).

Independente da matriz energética, a energia elétrica gerada precisa ser transmitida do local da geração até os locais de consumo, que é realizada através de linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão. De acordo com a ONS (2019), atualmente no Brasil possui linhas de transmissão de 138 kV, 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV, 750 kV distribuídas praticamente em todo território brasileiro, como mostra o mapa da Figura 2-1, inclusive interligação com sistema de rede de transmissão de energia elétrica com Países vizinhos tais como Venezuela, Argentina.

Figura 2-1- Malha de linhas de transmissão no Brasil e na região nordeste.





Fonte: ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico (2020)

Com respeito ao concreto armado, de acordo com as definições da norma brasileira a NBR 6118 (ABNT, 2003) estabelece:

- Elementos de concreto simples estrutural: *elementos estruturais elaborados com concreto que não possui qualquer tipo de armadura ou que a possui em quantidade inferior ao mínimo exigido para o concreto armado.*
- Elementos de concreto armado: *aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais **não** se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência.*
- Armadura passiva: *qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada.*

No concreto armado a armadura é chamada passiva, o que significa que as tensões e deformações nela existentes devem-se exclusivamente às ações externas aplicadas na peça.

O trabalho conjunto entre o concreto e a armadura fica bem caracterizado na comparação de uma viga sem armadura e com armadura. Supondo que as forças aplicadas sobre as vigas aumentem gradativamente de zero até a ruptura, a viga sem

armadura rompe bruscamente tão logo inicia-se a primeira fissura, o que ocorre quando a tensão de tração atuante alcança a resistência do concreto à tração. Já a viga de concreto armado tem a capacidade resistente à flexão significativamente aumentada devido à existência da armadura.

Estruturas de Concreto Utilizado em linhas de transmissão de perfil plano. Suas principais vantagens são:

- vida útil elevada;
- montagem simples;
- não necessita de conservação;
- geralmente não necessita de reforço nas fundações devido ao peso próprio elevado;
- ótima aparência.

Como desvantagens, pode-se citar:

- o peso;
- dificuldade de transporte, principalmente em terrenos acidentados e de difícil acesso;
- controle de qualidade durante a fase de fabricação da estrutura.

De acordo com a literatura, as torres metálicas de transmissão de energia elétrica caracterizam-se por serem estruturas de grande extensão linear,

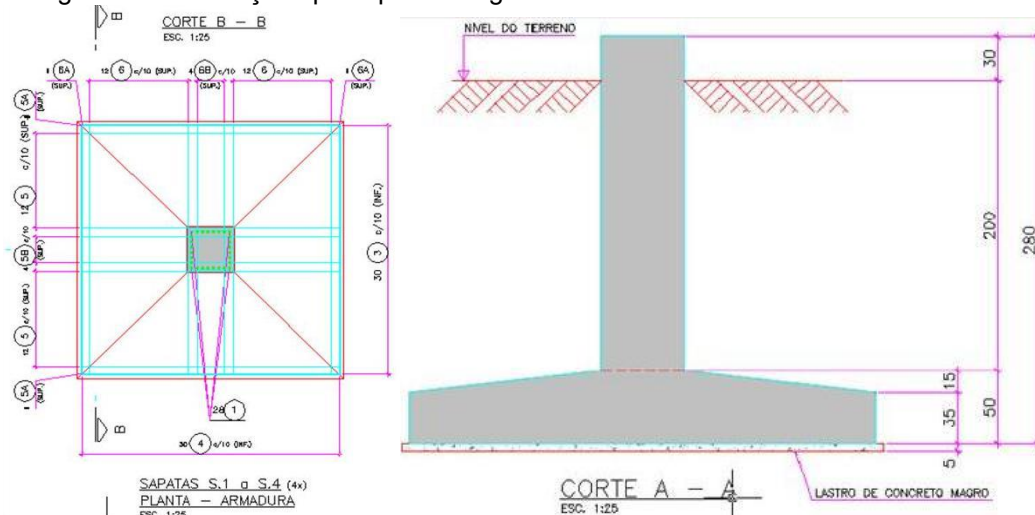
As fundações destas torres servem de base para as estruturas metálica. De acordo com as literaturas, normalmente adotam-se fundações do tipo: grelha metálicas, estacas, tubulão e sapata em obras de linha de transmissão, sempre mediante prospecção da natureza do solo. As fundações têm um papel de fundamental importância neste tipo de empreendimento, pois a escolha da solução pode impactar diretamente não somente no tempo de execução da obra e custo, mas no período de energização da linha. (LABEGALINI, *et al*, 1992)

Os critérios adotados em um projeto que envolve a fundação, a estrutura e a execução das provas de cargas na fundação, permitem obter uma redução de custo em linhas de transmissão (LT).

As torres metálicas autoportantes são feitas de estruturas metálicas galvanizadas a fogo, compostas por uma parte reta superior e uma parte piramidal na base. São formadas por módulos treliçados e possuem diversas tipologias. As torres

metálicas autoportantes utilizam os seguintes tipos de fundação, tais como tubulão, sapatão, estaca, bloco e grelha.

Figura 2-2- Fundação tipo sapata é largamente utilizada em linhas de transmissão.



Fonte: Portal Metálica

As fundações tipo sapata são elementos de fundação superficial, construídos em concreto armado, dimensionado de modo que as tensões de tração não sejam resistidas pelo concreto, mas sim, pelo emprego de barras de aço, como mostra a Figura 2-2. Este tipo de fundação é aplicado em pequenas profundidades, de 2 a 3 metros, devido à dificuldade de escavação profunda (presença de água e desbarrancamento). Não deve ser utilizada em locais sujeitos à erosão. É executada com escavação total, ou seja, retirada de todo o terreno atuante na vertical sobre a base (geralmente quadrada ou retangular) da fundação.

Figura 2-3- Fotos mostrando que as fundações de concreto armado para torres metálicas autoportantes para linhas de transmissão são preparadas nas condições locais.

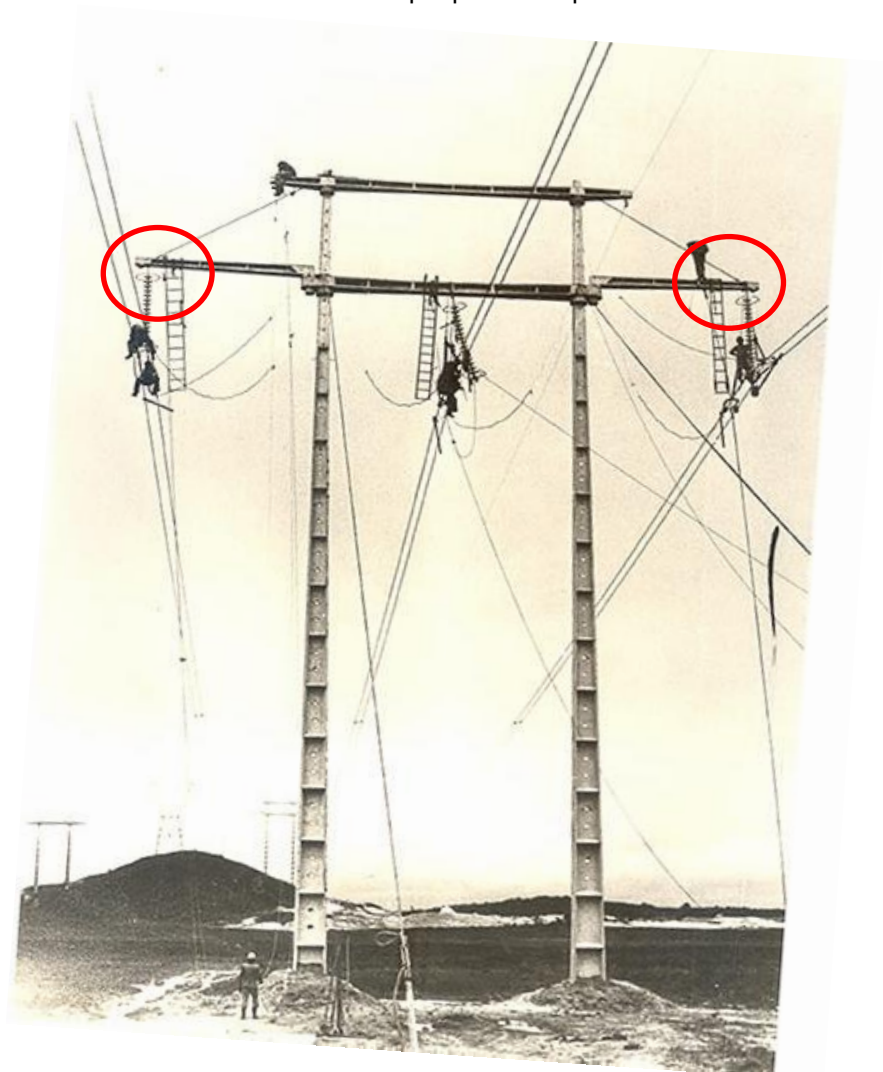




A sapata é viável economicamente para torres de suspensão, em virtude dos pequenos esforços na fundação. Para torres de ancoragem e terminal (grandes esforços), devem ser feitas comparações de custo com as fundações em bloco e estaqueada.

Ademais, uma parcela substancial das torres de transmissão é de concreto para linhas de 230 kV e 69 kV, os quais utilizam parafusos para fixação de cadeias de isoladores, cruzetas. Estes parafusos, eventualmente, estão sujeitas às condições favoráveis do ponto de vista de corrosão elétrica e ambiental, sofrem perda de massa nos parafusos, como consequência, redução na resistência mecânica que pode levar a queda do cabo ao chão e desligamento da linha.

Figura 2-4- Construção da linha de transmissão de 500 kV e em operação. Os círculos em vermelho mostram o local que possui os parafusos.



Diante das problemáticas expostas acima, que a inspeção da integridade estrutural de tais estruturas de concretos de grande dimensão, de parafusos de fixação de cadeias de isoladores e cruzeta no interior do concreto das torres de concreto possa ser avaliada sem a necessidade de desligar a linha de transmissão, e de equipamentos de subestações utilizando uma técnica não destrutiva e sem a necessidade de desligamento de energia elétrica.

Krause et.al. (1996) realizou testes com técnicas de Ensaio Não Destrutivo por Correntes Parasitas (END-EC) que é uma avaliação da integridade ou detecção de defeitos de membros de concreto, mesmo quando eles são acessíveis apenas a partir de uma única superfície. Essas inspeções só podiam ser resolvidas por meio de radiografia (para espessuras de concreto inferiores a 0,6 m) ou usando métodos mais ou menos destrutivos especialmente em estruturas de concreto armado. A técnica

END-EC realizada ainda precisa de melhorias, mas se mostraram muito úteis para entender melhor os processos envolvidos.

Dentre as técnicas de ensaio não destrutivas, a técnica de radiografia é considerada a mais confiável e adequada para tais propósitos, pois permite observar através de imagens radiográficas diferentes tipos de falhas tais como vazios, desgaste, degradação, fissuras, avaliação de espessura.

No ano de 2018, pesquisadores como Kayralapov e sua equipe realizaram um exame crucial utilizando raios-X de alta energia com o objetivo de realizar uma inspeção não destrutiva em novas peças de fundição de aço de grande espessura. Este método foi aplicado para dois propósitos principais: avaliar as alterações na densidade do material e identificar quaisquer defeitos prejudiciais internos que pudessem comprometer a qualidade da fundição. Essa abordagem reflete uma tendência consolidada na indústria, onde muitas empresas estão atualmente dedicando esforços para produzir e desenvolver sistemas de Tomografia Computadorizada (TC) de alta energia. A finalidade desses sistemas avançados é testar e garantir a integridade de componentes críticos, como fundições de aço de parede espessa, peças de grande porte e produtos com geometria de construção complexa, assegurando assim a sua confiabilidade e segurança.

Na atualidade, existem no mercado sistemas de radiografia para inspecionar, por exemplo, concreto armado com a gamagrafia utilizando isótopo de cobalto-60 (1,17 MeV e 1,33 MeV e meia vida de 5,26 anos), que é uma fonte de radiação de emissão constante de raios gama, mas a espessura máxima de inspeção está limitada a 50 cm de espessura.

Entretanto, devido à natureza de baixa sensibilidade dos filmes industriais empregados em gamagrafia, utiliza-se isótopo de cobalto-60 de altíssima atividade, isto é, acima de 100 Ci (Curie). Do ponto de vista de radioproteção, a utilização de tal sistema exige balizamento extremamente grande de área, raios superiores a 300 m em torno do local, e, os operadores estarão sujeitos à exposição de alta dose de radiação durante período de exposição. Outro fator crítico do sistema de radiografia com cobalto-60 é o transporte de radioisótopo que é de alta complexidade e requer um cuidado e um treinamento especial, muito diferente de uma fonte de raios-X. Ademais, em função da energia e intensidade requerida para radiografar grandes estruturas de concreto armado, a dimensão da fonte do radioisótopo de cobalto-60 é

dezenas de milímetros, que influencia na qualidade da imagem. Estas características tornam a sua utilização bastante limitada para os propósitos do projeto.

2.2 Isoladores Elétricos para Linhas de Transmissão

Os isoladores elétricos desempenham um papel crucial na infraestrutura de transmissão e distribuição de energia, sendo responsáveis por sustentar os cabos elétricos aéreos e isolar eletricamente as torres de sustentação. Atualmente, o setor elétrico emprega dois tipos principais de isoladores: cerâmicos (porcelana ou vidro) e compósitos (ou poliméricos). Esses componentes variam em formato e dimensão, adaptando-se às tensões nominais das linhas de transmissão e distribuição (SILVA, 2009).

A utilização de isoladores cerâmicos remonta a mais de um século, enquanto os isoladores compósitos são uma inovação mais recente, com aproximadamente três décadas de aplicação (MACKEV; SHAH, 1997). Dada sua localização ao ar livre, os isoladores estão constantemente expostos a intempéries e a severas tensões mecânicas, devido ao peso e extensão dos cabos elétricos que sustentam.

A Figura 2-5 ilustra exemplos de isoladores de vidro, porcelana e compósitos. É comum que as unidades de isoladores de vidro e porcelana sejam montadas em cadeias, cujo número de unidades é determinado pela tensão nominal da linha.

Figura 2-5- Isoladores de linhas de transmissão de energia: (A) isolador de vidro, (B) isolador de porcelana e (C) isolador de compósito.



Fonte: Silva, 2009

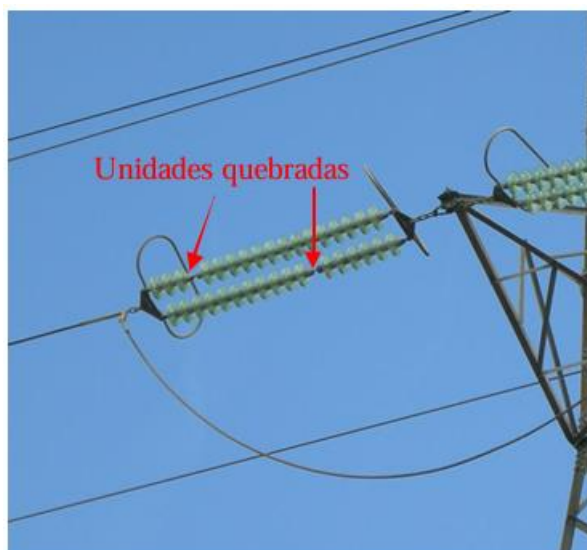
No Brasil, as linhas de transmissão operam com tensões elétricas padronizadas de 69 kV, 138 kV, 230 kV, 500 kV e 750 kV. Sua principal função é conectar as usinas geradoras de energia elétrica às concessionárias responsáveis pela sua comercialização. Em contraste, as linhas de distribuição, que operam com tensões abaixo de 138 kV, são a ponte entre as empresas comercializadoras e o consumidor final.

Devido à sua importância e às condições adversas a que são submetidos, os isoladores elétricos são objeto de investigação sistemática. Atualmente, a pesquisa envolve a realização de testes em laboratório, conforme destacado por Hackam (1999), que buscam simular as condições reais de operação às quais esses componentes são expostos nas linhas de transmissão.

A introdução dos isoladores de compósito em linhas de transmissão teve início no final da década de 1960, mas sua aplicação em larga escala só se consolidou a partir de 1980. Atualmente, esses isoladores representam mais de 20% do total de isoladores empregados em linhas de transmissão nos Estados Unidos da América (HALL, 1993). No Brasil, embora o número exato de isoladores de compósito instalados seja desconhecido, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf), por exemplo, já conta com mais de 47.000 unidades em suas instalações (PAIVA; SIMÕES, 2009).

Os isoladores de compósito foram desenvolvidos para mitigar problemas inerentes aos isoladores cerâmicos preexistentes, principalmente seu elevado peso e vulnerabilidade ao vandalismo (BURNHAM; WAIDELICH, 1997). A Figura 2-6 ilustra essa fragilidade, mostrando uma cadeia de isoladores de vidro de uma linha de 230 kV da Chesf com unidades quebradas, provavelmente por vandalismo, o que eleva o risco de interrupção elétrica.

Figura 2-6- Cadeia de isoladores de vidro em ancoragem de uma linha de transmissão de 230 kV.



Fonte: Silva, 2009.

Além de resolverem essas questões, os isoladores de compósito oferecem diversas vantagens em comparação aos cerâmicos, incluindo: facilidade de manuseio, reduzido tempo de fabricação, simplicidade na instalação e maior resistência às intempéries (ALMEIDA, 2004). Contudo, é importante notar que sua vida útil estimada é de 30 a 40 anos, inferior à dos isoladores de porcelana ou vidro, que pode variar entre 60 e 90 anos (HALL, 1993).

Nos isoladores de compósito (também conhecidos como poliméricos), o bastão central é constituído por um material compósito, que desempenha as funções cruciais de sustentação estrutural e isolamento elétrico. Esse núcleo é então revestido por uma camada polimérica, que pode ser composta por diversos materiais, como silicone (silicone rubber - SIR), etileno-propileno-metileno (EPM), etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM), epóxi cicloalifática (CE), acetato de vinil-etileno (EVA) ou politetrafluoretileno (PTFE) (FERREIRA, 2007).

A principal função dessa camada polimérica é fornecer proteção contra agentes externos, como a chuva, e dificultar a ocorrência de descargas elétricas entre a fase e a torre de sustentação. Isso é alcançado ao aumentar o "caminho elétrico" que um feixe de descarga elétrica precisaria percorrer até a torre de sustentação (e, consequentemente, o aterramento) (KUMOSA et al., 2005).

Os isoladores de compósito são frequentemente chamados de isoladores não-cerâmicos. A Figura 2-7 apresenta uma imagem de isoladores de compósito

instalados em uma linha de transmissão de 230 kV da Chesf, ilustrando sua aplicação prática.

Figura 2-7- Isoladores de compósito em suspensão de uma linha de transmissão de 230 kV.



Fonte: Silva, 2009

2.3 Inspeção Não Destrutiva e Monitoramento de Linhas de Transmissão

2.2.1 Técnicas de ensaios não destrutivos atualmente empregados

2.2.1.1 Inspeção visual

A Inspeção Visual é reconhecida como um dos métodos mais tradicionais e economicamente acessíveis para o monitoramento de linhas de transmissão. O processo envolve a utilização de recursos como binóculos, drones ou inspeções realizadas a pé para que os técnicos possam identificar anomalias visíveis, tais como corrosão, danos mecânicos ou obstruções.

Embora seja uma abordagem relativamente simples, exige um olho treinado para o reconhecimento eficaz de problemas estruturais e em componentes. A Inspeção Visual é, portanto, uma etapa inicial de diagnóstico fundamental antes da aplicação de tecnologias mais avançadas, assegurando que todas as seções da linha sejam examinadas de forma regular.

Fotografia

A inspeção visual de ativos, que emprega câmeras combinadas com lentes de longo alcance — técnica também aplicada na captura de imagens via drones — baseia-se na tese de que a qualidade fotográfica é fundamental para otimizar o monitoramento de infraestruturas. A capacidade de obter imagens de alta resolução e precisão permite não apenas a evidenciação de defeitos em pontos de difícil visualização, mas também se traduz diretamente em ganhos operacionais e de segurança, notadamente pela redução da necessidade de escaladas em torres.

Figura 2-8- Inspeção com fotografia



Fonte: Semensato, 2024

Assim, o investimento em treinamento nas técnicas fotográficas é justificado, pois as imagens de qualidade geradas tornam-se insumos valiosos, podendo ser utilizadas de forma eficiente em análises detalhadas e programas de treinamento contínuo de pessoal.

Binóculo

A inspeção visual de ativos sustenta a tese de que o binóculo é um instrumento essencial, não apenas por fornecer a aproximação ótica necessária, mas por sua capacidade de gerar uma visualização detalhada dos componentes em campo. Para que essa ferramenta cumpra seu papel de forma eficaz no diagnóstico, é imperativo que a imagem transmitida seja de alta resolução, estabilizada e completamente livre de distorções. Somente a observação que atende a esses critérios de qualidade permite o reconhecimento preciso de anomalias sem a necessidade de contato físico,

validando o binóculo como um dispositivo crítico para o monitoramento confiável da integridade dos ativos.

Figura 2-9- Inspeção com binóculo.



Fonte: Semensato, 2024

Drone

Historicamente, os helicópteros eram amplamente empregados nestas inspeções. Contudo, hoje, os drones estão progressivamente tomando o lugar dos helicópteros na fiscalização de ativos de energia, como torres de transmissão, graças à sua notável eficiência e capacidade de coletar dados de alta qualidade. Essa transição resulta em uma redução significativa dos custos operacionais, visto que os drones são economicamente mais vantajosos. Adicionalmente, as crescentes restrições regulatórias e o alto risco inerente às operações com helicópteros têm motivado as concessionárias a buscar e implementar soluções mais inovadoras.

Figura 2-10- Inspeção por drones.



Fonte: Semensato, 2024

Contudo, para que esse ganho operacional seja plenamente realizado, é crucial que a implementação venha acompanhada de um tripé de requisitos: treinamento especializado para a operação dos equipamentos, estrito cumprimento das regulamentações vigentes e o domínio da análise avançada de imagens. Apenas a integração desses fatores garante que a tecnologia drone se estabeleça como um método de inspeção seguro, conforme e altamente produtivo.

2.2.1.2 Termovisor de infravermelho

A Termografia Infravermelha (TIV), dentro de certas limitações, é reconhecida como um método de Ensaio Não Destrutivo (END) de natureza remota, rápido e econômico, com capacidade de fornecer informações tanto qualitativas quanto quantitativas. Especificamente no contexto do concreto armado, a TIV pode ser empregada para a localização e delimitação de anomalias subsuperficiais como vazios, delaminações e descolamentos (BUYUKOZTURK, 1998).

As aplicações desta técnica na engenharia civil são amplas, abrangendo a termografia de pontes, rodovias, pavimentos asfálticos, sistemas de esgoto, tubos de águas residuais, canais, aquedutos e a avaliação térmica interna e externa de edifícios.

O princípio fundamental da TIV baseia-se no fato de que anomalias subsuperficiais em um material provocam diferenças localizadas na temperatura de sua superfície. Isso ocorre devido a taxas distintas de transferência de calor nas zonas afetadas em comparação com as áreas sãs. A TIV funciona detectando a emissão de radiação térmica da superfície do material. Esse sinal térmico é então processado para gerar uma imagem visual (termograma) que pode ser correlacionada ao tamanho e à extensão de um defeito interno.

A maioria das aplicações utiliza uma câmera termográfica equipada com um detector sensível ao infravermelho, capturando os contrastes dessa radiação térmica. O levantamento termográfico pode envolver fontes de excitação ativas (como um *flash* ou aquecedores) ou passivas (como a radiação solar) [Ht].

Buyukozturk (1998) diz que a transferência de calor ocorre de três modos: condução, convecção e radiação. Do ponto de vista dos END, o modo de maior interesse é a radiação, pois é o calor irradiado que as câmeras infravermelhas

detectam. Contudo, uma compreensão clara dos demais modos é essencial para a correta avaliação das limitações da TIV.

Qualquer material a uma temperatura acima do zero absoluto emite energia continuamente. Essa energia, denominada radiação térmica, é transmitida no espaço na forma de ondas eletromagnéticas, onde as ondas infravermelhas constituem uma parte desse espectro (assim como micro-ondas ou raios X).

O fluxo radiante ϕ_r por unidade de área superficial do material relaciona-se à quarta potência de sua temperatura absoluta T pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$\phi_r = \epsilon \sigma T^4$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, e ϵ é a emissividade do material.

A condução é o mecanismo de transferência de calor pelo qual uma quantidade de energia introduzida em um local se difunde gradualmente por todo o material. Na engenharia civil, a importância da condução reside no fato de que, se os defeitos estiverem profundamente localizados no concreto ou se o seu diâmetro for pequeno em relação à profundidade, o contraste térmico na superfície será minimizado devido à difusão por condução. Consequentemente, tais defeitos podem permanecer não detectados pela TIV.

A convecção é o modo de transferência de calor que ocorre entre o material e um volume de fluido (geralmente o ar) com temperatura diferente, fluindo sobre a superfície. O efeito da convecção é particularmente relevante nos END de estruturas de concreto realizadas em campo. Por exemplo, uma alta velocidade do vento no momento da medição pode afetar significativamente a radiação de calor da superfície do concreto, levando à obtenção de imagens termográficas com resultados errôneos (imagens falsas).

Os parâmetros de levantamento mais críticos para o sucesso das técnicas de TIV são a radiação solar, a emissividade da superfície e a velocidade do vento. Para a avaliação quantitativa de estruturas de concreto, correções podem ser aplicadas aos dados de medição, considerando os efeitos da emissividade, temperatura do céu, velocidade do vento e radiação de objetos circundantes. No entanto, os levantamentos com TIV permanecem restritos a certas condições climáticas.

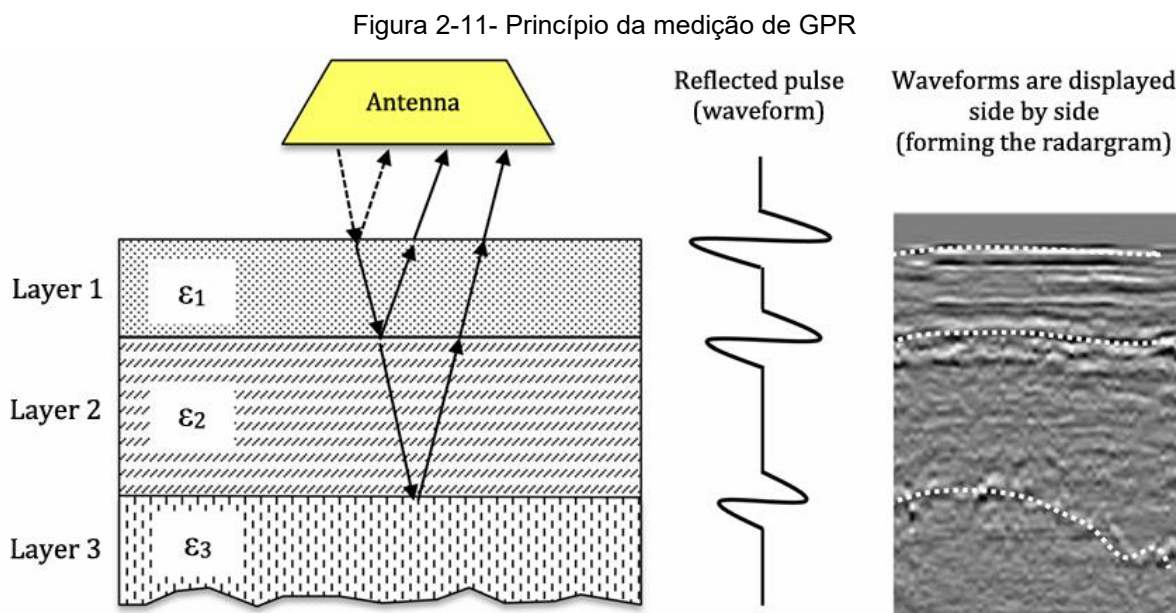
Outra limitação inerente da termografia infravermelha é a sua incapacidade de fornecer informações sobre a profundidade dos defeitos, uma vez que detecta apenas a radiação emitida pela superfície do concreto. Para mitigar essa restrição, a técnica

pode ser efetivamente combinada com o Radar de Penetração no Solo (GPR) (BUYUKOZTURK, 1998).

2.2.1.3 Imagem de radar (micro-ondas)

As aplicações da técnica de radar (Ground Penetrating Radar - GPR) em engenharia civil abrangem a inspeção de rodovias e lajes de pontes, a detecção de cavidades subjacentes a revestimentos de túneis de concreto e a detecção e quantificação de erosão localizada em torno de pilares de pontes. Não obstante, a utilização do método de radar em elementos estruturais de concreto, como vigas, pilares e paredes, encontra-se ainda em estágios iniciais de desenvolvimento (BUYUKOZTURK, 1998).

Lalagué et al. (2016) diz que o GPR é um método de levantamento geofísico utilizado para obter remotamente e de forma não destrutiva uma imagem dos materiais subterrâneos. A técnica é baseada na propagação de ondas eletromagnéticas em materiais dielétricos.



Fonte: Lalagué et al., 2016.

O princípio fundamental do método de radar reside na geração e transmissão de pulsos eletromagnéticos curtos ou ondas harmônicas de tempo através de uma antena transmissora em direção a um meio alvo, com o consequente registro dos sinais dispersos na antena receptora. A propagação das ondas eletromagnéticas no

espaço livre e em meios materiais é regida por um conjunto de equações acopladas, denominadas equações de rotação e divergência de Maxwell. Ao se incorporarem as propriedades eletromagnéticas do material alvo e as condições de contorno apropriadas, é possível obter uma solução unívoca do problema direto mediante a aplicação das equações de rotação de Maxwell.

Buyukozturk (1998) diz que quando as ondas eletromagnéticas transmitidas incidem sobre um objeto ou outro meio com propriedades eletromagnéticas distintas, uma parcela da energia transmitida é refletida na interface, enquanto o remanescente é transferido para o novo meio, sofrendo algum grau de refração em função das propriedades materiais deste e do ângulo de incidência. Consequentemente, os sinais espalhados registrados no receptor veiculam informações sobre as propriedades eletromagnéticas do alvo, as quais podem ser extraídas através do processamento e da interpretação dos dados adquiridos.

Os sinais espalhados podem ser obtidos tanto em uma configuração bistática (como no experimento com deslocamento ou *pitch-catch*), na qual o transmissor e o receptor estão separados, quanto em um arranjo monostático (experimento de deslocamento zero ou *pulso-eco*), onde ambas as unidades coincidem. Dados adquiridos por meio da varredura do ponto de observação dentro de uma abertura pré definida, seja em modo monostático ou bistático, podem ser empregados para a reconstrução de imagens espaciais do alvo através de algoritmos de imageamento. No método de radar, a capacidade de visualizar inclusões embutidas em concreto, tais como barras de reforço e delaminações, exige a compreensão do concreto como um material dielétrico e a aplicação de técnicas avançadas de imageamento.

O sucesso dos algoritmos baseados em transformada para o imageamento de concreto é limitado por diversas razões. A principal restrição decorre do emprego das aproximações linearizantes de Born e Rytov, ambas aplicáveis apenas a objetos fracamente dispersivos. Para um meio condutivo com perdas, como o concreto, os métodos de inversão linear demonstram desempenho insatisfatório. Destarte, torna-se necessário o emprego de algoritmos iterativos baseados em transformada para a solução da Equação (6) para $O(x,y)$. Os métodos propostos incluem o Método Iterativo de Born e o Método Iterativo de Born Distorcido, cuja aplicação ainda se encontra em fase de pesquisa.

Uma limitação adicional advém do uso da equação de onda escalar como base para o processo de inversão. Estudos numéricos e experimentais, conduzidos por Btiyfi6ztfirk e Rhim, demonstraram que informações mais detalhadas podem ser extraídas dos campos espalhados ao se considerar a polarização das ondas eletromagnéticas (BUYUKOZTURK, 1998).

2.2.1.4 Imagem acústica

Segundo Buyukozturk (1998), as técnicas acústicas englobam o ultrassom, o eco de impacto e os métodos de emissão acústica. Em sua essência, estes métodos fundamentam-se na propagação de ondas elásticas em sólidos. A propagação do som ocorre sob a forma de ondas de compressão (P), ondas de cisalhamento (S) no interior do sólido e ondas superficiais ou ondas de Rayleigh (R) ao longo da superfície. As não-homogeneidades presentes na matriz do concreto induzem o espalhamento das ondas sonoras, cujos sinais dispersos podem ser registrados e interpretados para extrair informações pertinentes sobre o material (BUYUKOZTURK, 1998).

A técnica de eco de impacto envolve a transmissão de um pulso transitório no concreto por meio de um impacto mecânico e a subsequente análise das ondas refletidas registradas na superfície do material. Devido à sua baixa faixa de frequência, esta técnica não é empregada para fins de imageamento. Contudo, o método é útil para um levantamento preliminar rápido da área, visando à localização de anomalias. O imageamento dessas anomalias pode ser posteriormente obtido por meio de métodos de ensaio ultrassônico mais abrangentes.

A técnica de emissão acústica (EA) constitui um método passivo de monitoramento de condição que permite o teste contínuo de uma estrutura enquanto em serviço, em contraposição a inspeções em intervalos regulares. A emissão acústica refere-se aos pulsos gerados pela alteração na energia de deformação elástica, que ocorre localmente no material como resultado de processos de deformação e fratura. Parte dessa energia propaga-se através do material e pode ser detectada por transdutores altamente sensíveis posicionados na superfície da estrutura. A técnica de EA é utilizada primariamente para detecção, não oferecendo capacidade de imageamento.

Buyukozturk (1998) diz que o termo ultrassônico refere-se ao estudo e à aplicação do ultrassom, que consiste em som com frequência superior ao limiar de detecção do ouvido humano, tipicamente acima de aproximadamente 18 kHz. A técnica envolve a transmissão de ondas ultrassônicas no concreto por intermédio de um transdutor em contato com a superfície do objeto. Os sinais dispersos são subsequentemente registrados e interpretados. Os dados obtidos em experimentos ultrassônicos podem ser utilizados para a reconstrução de uma imagem das inclusões e heterogeneidades no concreto, empregando algoritmos de imagem tomográfica. As aplicações desta técnica na avaliação da condição do concreto incluem a determinação da espessura, a medição do módulo de elasticidade, e a detecção e visualização de fissuras, vazios e delaminações.

O imageamento por ultrassom é geralmente realizado considerando o ultrassom como um fenômeno de onda acústica escalar. Dessa forma, a abordagem de imageamento descrita para a imagem por micro-ondas é diretamente aplicável ao imageamento por ultrassom.

As técnicas de pulso-eco ultrassônicas compreendem a introdução de um pulso de tensão no concreto, em uma superfície acessível, por meio de um transmissor. O pulso propaga-se pelo concreto e é refletido por fissuras, vazios, delaminações ou interfaces de materiais. As ondas refletidas (ecos) são registradas na superfície, e o sinal de saída do receptor é visualizado em um osciloscópio ou armazenado para processamento posterior. Existem diversos métodos de exame de uma amostra de teste empregando a técnica de pulso-eco.

- O método A-scan (ou A-scope) fornece uma visão unidimensional dos defeitos no concreto.
- O método B-scan (ou B-scope), por sua vez, envolve uma série de A-scans paralelos e produz uma visão bidimensional dos defeitos no concreto.
- O método C-scan (ou C-scope) consiste em uma série de A-scans paralelos realizados sobre uma superfície.

Para aplicações de imageamento ultrassônico de alta frequência, as quais são rotineiramente empregadas em ensaios não destrutivos (END) de metais, a visualização de B- ou C-scans pode fornecer informações significativas sobre defeitos internos devido à alta diretividade das ondas. Contudo, a presença de agregados

graúdos no concreto, frequentemente com diâmetros superiores a 10 mm, impõe que o ensaio ultrassônico seja realizado em frequências relativamente baixas a fim de evitar a atenuação excessiva causada pela dispersão. Consequentemente, o feixe ultrassônico praticamente não apresenta características direcionais, dificultando a inferência do tamanho dos defeitos. Os dados obtidos a partir de B- ou C-scans necessitam de processamento adicional para a extração de informações úteis sobre o tamanho das não-homogeneidades (BUYUKOZTURK, 1998).

2.2.1.5 Inspeção Radiográfica

Nas últimas duas décadas, observou-se uma substancial substituição dos sistemas convencionais de radiografia pelos sistemas de radiografia digital (LANÇA; SILVA, 2009). Essa inovação tecnológica impulsionou o desenvolvimento de novos métodos para detecção, leitura, processamento e impressão de imagens radiográficas.

A principal distinção da radiografia digital em relação à sua contraparte convencional reside no formato da imagem obtida. Enquanto na radiografia tradicional a imagem é física, na digital ela assume um formato digital, permitindo que as informações de imagem sejam acessadas e manipuladas em um computador. As vantagens dessa transição são notáveis:

- Eliminação do processamento químico do filme, o que agiliza o fluxo de trabalho e reduz impactos ambientais.
- Possibilidade de utilizar doses menores de radiação, beneficiando tanto pacientes quanto operadores.
- Menor risco de saturação que levaria à perda da radiografia.
- Capacidade de aplicar técnicas de processamento de imagens digitais para aprimorar as características da imagem, aumentando a clareza e o detalhe.

Os sistemas de radiografia digital são amplamente classificados em duas categorias principais: radiografia computadorizada e radiografia digital (SAMEI et al., 2004; KÖRNER et al., 2007; VAIDYA, 2007). No entanto, outras classificações também são frequentemente utilizadas, como a distinção entre radiografia digital

direta e radiografia digital indireta (que engloba a radiografia computadorizada) (SCHAETZING, 2003).

Embora os dispositivos CCDs (charge-couple devices) sejam considerados sistemas de conversão digital indireta, eles não pertencem à categoria dos flat-panels. Suas aplicações são majoritariamente direcionadas a outras áreas médicas, como mamografia e radiografias odontológicas, e, portanto, não serão abordados em detalhes nesta discussão.

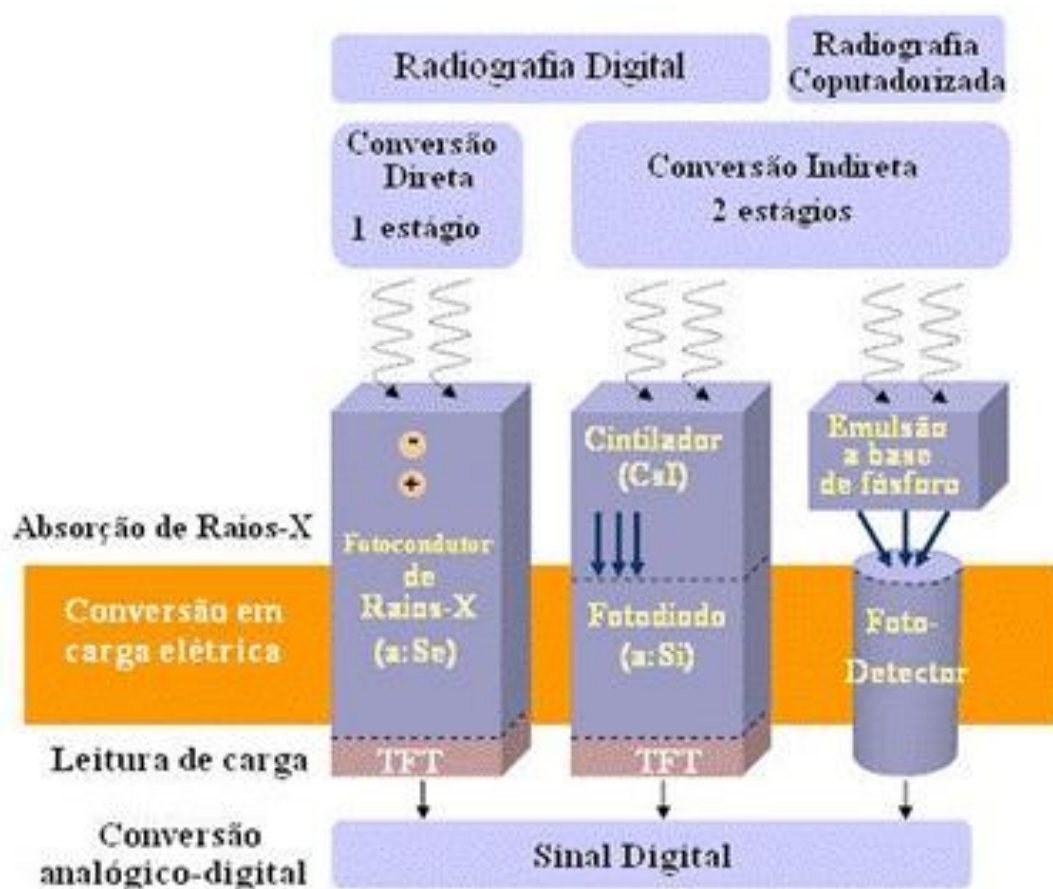
A classificação dos sistemas de radiografia digital está intrinsecamente ligada à forma como a imagem é lida e armazenada. A técnica de Radiografia Computadorizada (CR) emprega filmes com emulsão à base de fósforo, como as Imaging Plates. Nesses sistemas, a leitura do filme é realizada separadamente por um sistema dedicado, o que os classifica como sistemas digitais de conversão indireta.

Por outro lado, na técnica de Radiografia Digital (DR), a detecção da imagem ocorre através da conversão direta dos raios-X em carga elétrica em detectores do tipo TFT (Thin-Film Transistor) (LANÇA; SILVA, 2009). Esses sistemas podem ser subdivididos em dois grupos, baseando-se no método de conversão dos raios-X:

- Detectores de Conversão Direta tipo TFT: Nestes detectores, um fotocondutor de raios-X, como o selênio amorfo (a-Se), converte os fótons de raios-X diretamente em carga elétrica em um único estágio.
- Detectores de Conversão Indireta: O processo de conversão nesses detectores ocorre em dois estágios. No primeiro estágio, um material cintilador, como o iodeto de cério (CsI), converte os fótons de raios-X em fótons de luz visível. Em seguida, no segundo estágio, essa luz visível é convertida em carga elétrica em um fotodiodo de silício amorfo.

A Figura 2-12 apresenta um modelo geral que descreve ambos os sistemas de radiografia computadorizada e digital, facilitando a compreensão de seus princípios operacionais.

Figura 2-12- Modelo de descrição geral dos sistemas digitais de radiografia.



Fonte: Adaptado de Lança e Silva, 2009.

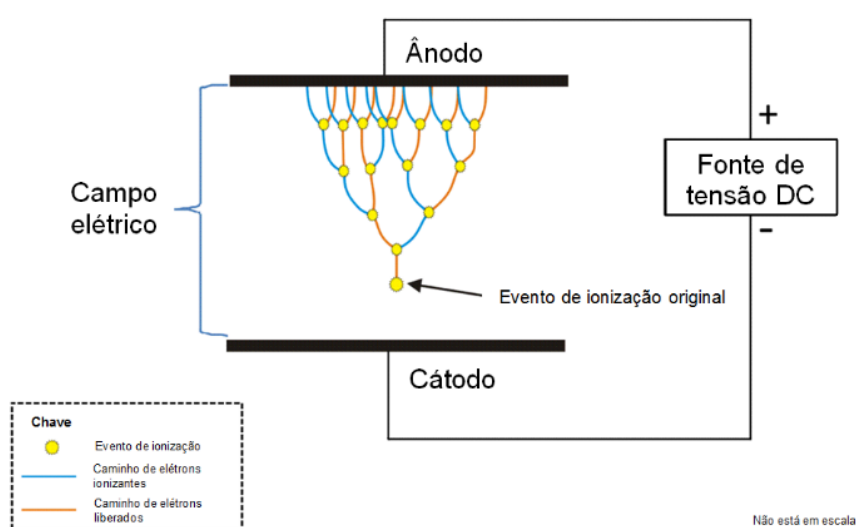
2.3 Ocorrência de descarga elétrica devido ao efeito combinado do campo elétrico e da ionização do ar pelo raios-X

O Princípio da Descarga Townsend descreve o mecanismo pelo qual a condução elétrica é estabelecida e sustentada em um meio gasoso, como o ar. Esse fenômeno se inicia com a presença de elétrons livres preexistentes no gás. Quando submetidos a um campo elétrico de intensidade suficiente, esses elétrons são acelerados, ganhando energia cinética.

A essência do princípio reside nas colisões inelásticas que ocorrem entre esses elétrons acelerados e as moléculas neutras do gás. Durante essas colisões, se a energia do elétron incidente for superior à energia de ionização da molécula, esta pode ser ionizada, liberando um ou mais elétrons adicionais. Esse processo de ionização por impacto gera novos elétrons livres, que, por sua vez, também são acelerados pelo campo elétrico e podem causar novas ionizações.

O resultado é uma reação em cadeia caracterizada pela multiplicação de avalanches de elétrons. Cada elétron original gera um número crescente de novos elétrons e íons, formando uma trajetória condutiva. Essa proliferação exponencial de portadores de carga é o que permite a condução elétrica através de um gás que, em condições normais, é um isolante. Portanto, a descarga Townsend é um mecanismo fundamental para a compreensão da ruptura dielétrica em gases e fenômenos como as descargas elétricas.

Figura 2-13- Avalanche de Townsend



Fonte: Wikipedia.

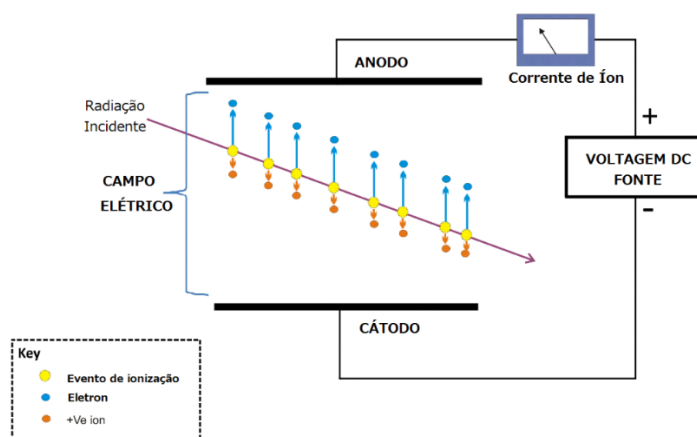
Quando os raios-X incidem sobre um gás, a energia dos fótons de raios-X é suficiente para arrancar elétrons das camadas eletrônicas dos átomos ou moléculas do gás. Esse processo, conhecido como ionização, resulta na formação de pares elétron-íon. A quantidade de pares elétron-íon gerados é diretamente proporcional à intensidade da radiação ionizante incidente. Em outras palavras, quanto mais intensos forem os raios-X, maior será o número de ionizações e, conseqüentemente, maior a quantidade de íons e elétrons livres produzidos no gás.

Knoll (2010) diz que quando uma partícula carregada rapidamente atravessa um gás, criam tanto moléculas excitadas quanto moléculas ionizadas ao longo de seu caminho. Após uma molécula neutra ser ionizada, o íon positivo resultante e o elétron livre são chamados de par de íons, e ele serve como o constituinte básico do sinal elétrico desenvolvido pela câmara de íons. Íons podem ser formados tanto por interação direta com a partícula incidente, quanto por meio de um processo

secundário no qual parte da energia da partícula é inicialmente transferida para um elétron energético ou “raio delta”. Independentemente dos mecanismos detalhados envolvidos, a quantidade prática de interesse é o número total de pares de íons criados ao longo da trilha da radiação.

As câmaras de ionização são dispositivos projetados especificamente para detectar e quantificar essa ionização. O princípio de funcionamento é baseado na coleta dos íons e elétrons gerados. Uma câmara de ionização típica consiste em um volume preenchido com gás (geralmente ar ou um gás inerte) e dois eletrodos, um ânodo (positivo) e um cátodo (negativo), entre os quais é aplicada uma diferença de potencial elétrico (tensão).

Figura 2-14- Câmara de ionização dos raios-X.



Fonte: Wikipedia.

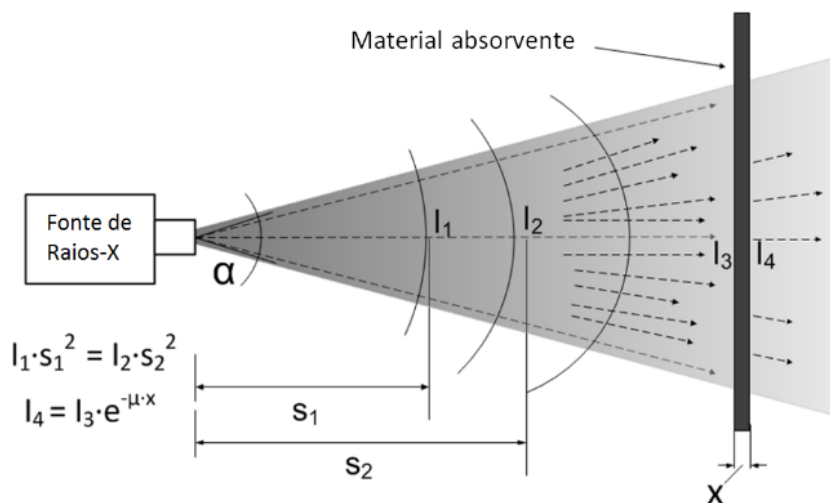
Quando a radiação X ioniza o gás dentro da câmara, os elétrons livres são atraídos para o ânodo e os íons positivos para o cátodo devido ao campo elétrico. Esse movimento de cargas constitui uma corrente elétrica mensurável. A magnitude dessa corrente é diretamente proporcional ao número de pares elétron-íon formados, que, por sua vez, reflete a intensidade da radiação ionizante.

Ao medir essa corrente, a câmara de ionização é capaz de detectar e quantificar a intensidade da radiação X. Esse método é amplamente utilizado em diversas áreas, como a dosimetria de radiação em medicina (radioterapia e diagnóstico por imagem), monitoramento ambiental e pesquisa científica, pois oferece uma forma precisa e confiável de avaliar a exposição à radiação.

A intensidade da radiação de raios-X (ou qualquer outra forma de radiação eletromagnética que se propaga isotropicamente de uma fonte pontual) diminui com o

quadrado da distância em relação à fonte emissora. Este princípio é fundamental para entender a atenuação da dose de radiação e é crucial em aplicações como a radiologia médica e a proteção radiológica.

Figura 2-15- Lei do inverso do quadrado da distância para raios-X.



Fonte: Wikipedia.

Testes experimentais foram conduzidos para avaliar o efeito da radiação ionizante durante o teste de imagem radiográfica. Esses experimentos ocorreram nas instalações do Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), localizado na cidade de Campina Grande, Paraíba, Brasil (FUJIWARA et al., 2017).

Figura 2-16- Arranjo experimental para teste.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

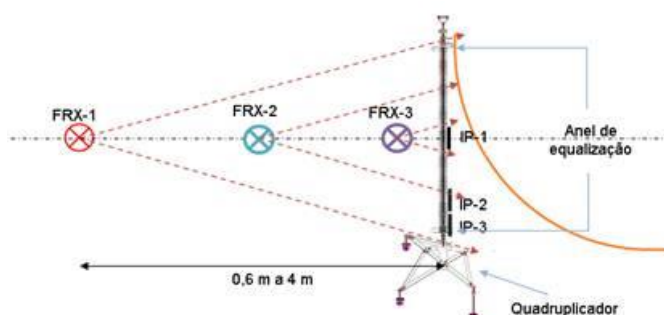
A distância entre a fonte de raios-X (FRX) e o isolador composto foi variada entre 60 cm e 400 cm. Para todos os testes, a potência máxima dos raios-X foi

empregada (120 kV e 1 mA). A placa de imagem foi utilizada como detector para aquisição das imagens.

O isolador de compósito em questão é destinado a linhas de transmissão de 500 kV, apresentando um comprimento de 380 cm. Sua concepção prevê uma tensão de ruptura de 1200 kV em condições ideais, ou seja, quando novo e isento de contaminação por poeira ou poluição. Detalhes específicos sobre sua construção e quaisquer fissuras foram documentados.

A Figura 2-17 ilustra esquematicamente o arranjo experimental que foi adotado para a realização dos testes radiográficos. Esse arranjo foi implementado em um laboratório de alta tensão energizado, detalhando as disposições dos IPs (Imaging Plates) que foram empregados.

Figura 2-17- Esquema do arranjo experimental do sistema de inspeção radiográfica do isolador de compósito energizado no laboratório de alta tensão, onde a fonte de raios-X (FRX) foi posicionada de 0,6 m a 4 m.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

Os testes de radiografia envolveram o uso de dois filmes, ambos acondicionados em invólucros de papel e posicionados junto ao isolador. O primeiro filme (identificado como IP-3) foi colocado no limite das aletas do isolador na parte inferior, ou seja, entre o isolador e o anel equalizador. O segundo filme (identificado como IP-2) foi posicionado logo acima, em sequência ao IP-3.

Neste ensaio, optou-se por realizar a radiografia com dois IPs (Placas de Imagem) posicionados em sequência e próximos um do outro, porém sem contato físico. O posicionamento foi estrategicamente escolhido para estar próximo à fase em que foi aplicada uma diferença de potencial de 550 kV. O principal objetivo dessa configuração era avaliar a viabilidade de aumentar a produtividade, reduzindo o tempo

de trabalho ao adicionar mais filmes detectores para uma única emissão da fonte de raios-X.

Nos testes preliminares conduzidos no laboratório de alta tensão a ocorrência de ionização do ar foi inicialmente detectada por meio do instrumento DAYCOR. Posteriormente, essa ionização manifestou-se de forma mais evidente através de centelhamentos atípicos, os quais não correspondiam ao comportamento usual de descargas em *gaps* (lacunas de ar) esperadas em trabalhos de alta tensão (FUJIWARA et. al., 2017).

Ao atingir a tensão desejada, iniciou-se a exposição de todo o isolador à radiação ionizante. Inesperadamente, durante a exposição radiográfica, notou-se a presença de chama entre o detector IP mais próximo à fase e o seu adjacente, conforme ilustrado na Figura 2-18.

Figura 2-18- Ocorrência de chamas nos detectores IP.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

As investigações subsequentes indicaram que o trilhamento ocorreu no papel que envolvia o IP posicionado na parte mais inferior, especificamente no interior do anel de equalização. Conforme pode ser observado na Figura 2-19, as bordas dos papéis que envolviam os filmes apresentaram características de princípio de chama, em alguns casos, sem queimar por completo.

Figura 2-19- Foram utilizados dois IPs SR (super resolution) disposto um acima do outro como mostrado na foto da esquerda. Em vermelho está destacado o incêndio e em azul os indícios de trilhamento. Na foto da direita observa-se o IP-2 que pegou fogo e o seu invólucro.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

Figura 2-20- Descarga elétrica na parte de cima do IP mais próximo à fase.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

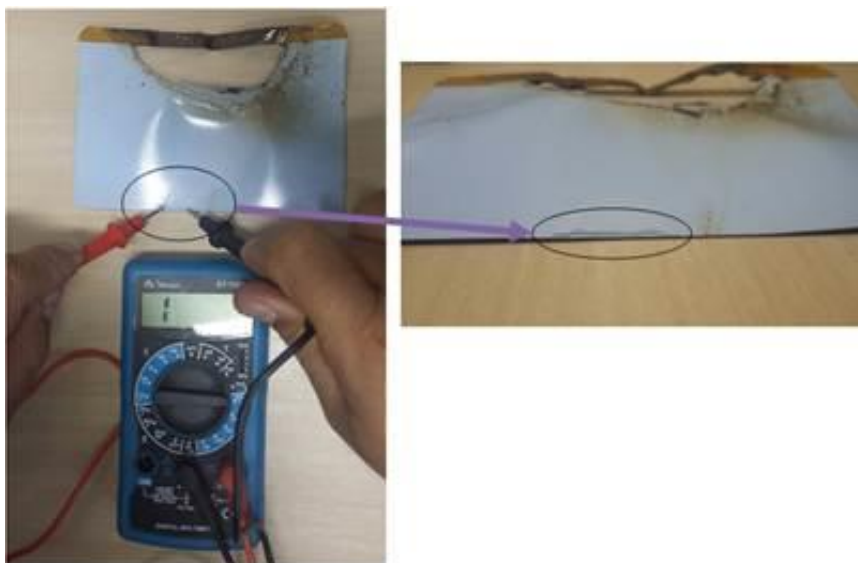
A causa exata da chama ainda não foi determinada com certeza, mas um ponto crucial a ser considerado é o posicionamento do filme inferior. Ele foi montado abaixo do anel equalizador, ficando muito próximo do limite do isolador na união com a ferragem do quadruplicador, que é responsável por sustentar os cabos de distribuição de eletricidade.

É provável que o fenômeno que originou a chama nos IPs tenha sido causado pelo elevadíssimo campo elétrico em que esses filmes estavam imersos. Uma seção considerável do isolador foi colocada em paralelo com esses filmes, que não foram projetados para suportar tais esforços elétricos. Dessa forma, à medida que a tensão

era aplicada, concentrações de campo nos filmes geraram descargas localizadas que elevaram a temperatura a ponto de inflamar o material que constitui o filme. Paralelamente a esse fenômeno, correntes de fuga provavelmente se estabeleceram nos filmes, o que facilitou ainda mais a formação das chamas.

Com o objetivo de medir a resistência no IP, foi realizado o teste utilizando um multímetro conforme Figura 2-21.

Figura 2-21- Teste sobre a resistência com o multímetro no Imaging Plate que pegou fogo.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

Com o intuito de aprofundar o conhecimento sobre a descarga e a subsequente chama observada no IP-2 durante o teste anterior, um novo ensaio foi realizado. Neste experimento, dois IPs foram unidos fisicamente, conforme ilustrado na Figura 2-22.

Figura 2-22- Dois IPs unidos fisicamente usando policarbonato resultando em torno de 85 cm de comprimento.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

Os dois IPs (Placas de Imagem), que foram fisicamente unidos conforme a Figura anterior, foram posicionados na parte inferior do isolador, próximos à fase. Essa configuração foi então submetida a uma tensão de 550 kV, conforme ilustrado na Figura 2-23.

Figura 2-23- Dois IPs unidos fisicamente e posicionados junto ao isolador polimérico com fita adesiva.



Fonte: Fujiwara et. al., 2017.

Neste ensaio, diferentemente do anterior, não houve ocorrência de incêndio. As imagens coletadas e as condições sob as quais o teste foi realizado, mesmo com um intenso campo elétrico, não apresentaram interferência nos dados. Adicionalmente, não foi observada nenhuma disrupção devido à ionização do ar pelos raios-X no entorno do isolador.

Mais especificamente, observou-se que quando a fonte de raios-X era posicionada a aproximadamente 0,6 metros de uma parte energizada e em condições de um campo elétrico já relativamente baixo, o acionamento da fonte de raios-X desencadeava um centelhamento. Esse fenômeno não só dificultava a extinção

natural de um pequeno arco elétrico que pudesse estar presente, mas também indicava uma alteração significativa nas propriedades dielétricas do ar devido à presença da radiação ionizante.

Fujiwara et al. (2017) explica que durante a fase de levantamento bibliográfico, notou-se uma lacuna significativa na literatura pertinente à variação da rigidez dielétrica do ar sob a influência direta da incidência de raios-X. Uma extensa pesquisa em bases de dados e publicações científicas não revelou estudos sistemáticos, gráficos, ou fórmulas que descrevessem quantitativamente essa relação.

Diante da inexistência de dados prévios robustos, tornou-se imperativo adotar uma abordagem experimental empírica, baseada em tentativa e erro. Essa metodologia foi posteriormente validada através de convergência estatística, mediante a repetição do experimento por dezenas de vezes. Nesse processo, os parâmetros críticos variados foram a distância entre a fonte de raios-X e a parte energizada, bem como a tensão aplicada, permitindo a coleta de um conjunto de dados para análise e inferência.

Durante os testes, diversas distâncias entre a fonte de raios-X e a parte energizada foram avaliadas, considerando tanto a praticidade experimental quanto a qualidade das imagens radiográficas resultantes. A análise dos resultados revelou que a distância de aproximadamente 1,2 metros representava o limiar para a persistência do arco elétrico previamente mencionado. Em outras palavras, observou-se que acima de 1,2 metros, o arco elétrico não se estabelecia nem persistia.

2.4 Inspeção não destrutiva de concreto

Shaw (1998) diz que os Ensaios Não Destrutivos (END) estão ganhando cada vez mais destaque e atenção na inspeção de estruturas de concreto, principalmente devido à sua confiabilidade e eficácia na avaliação da integridade dos materiais. Há um reconhecimento crescente da importância de realizar testes in-situ (diretamente na estrutura, no local de uso), o que representa uma mudança de foco na engenharia: está havendo um abandono progressivo da tradicional amostragem aleatória de concreto (que destrói a amostra) em favor da aplicação de técnicas sofisticadas não destrutivas diretamente na estrutura acabada.

De forma geral, as técnicas de END mais utilizadas para inspecionar grandes estruturas de concreto podem ser divididas em duas grandes categorias:

1. Métodos de Cobertura Ampla: Técnicas não destrutivas que são rápidas e eficientes para cobrir e avaliar grandes áreas e volumes da estrutura, dando uma visão geral da sua condição.
2. Métodos de Caracterização Detalhada: Técnicas específicas usadas para caracterizar e investigar detalhadamente áreas que apresentaram desvios ou onde há suspeita da existência de defeitos.

Os métodos de Ensaios Não Destrutivos (END) podem ser classificados como diretos ou indiretos, dependendo do tipo de informação que fornecem. Os métodos diretos são aqueles usados para obter informações físicas específicas, como o tamanho, a profundidade ou a condição física de um defeito ou componente. Já os métodos indiretos usam um ou mais parâmetros medidos para gerar informações que permitem avaliar o risco de danos ou identificar processos de deterioração que estejam em andamento na estrutura.

De modo geral, os END são ferramentas poderosas que fornecem dados essenciais relativos à resistência do material, à sua durabilidade potencial e à capacidade de carga da estrutura. Fica evidente, portanto, que a maior vantagem está em utilizar uma combinação de várias técnicas, pois métodos diferentes se complementam e fornecem uma visão de diagnóstico muito mais completa e precisa da estrutura de concreto (SHAW, 1998).

Na Tabela 2-1, é fornecido um resumo dos possíveis tipos de defeitos/danos e casos problemáticos que são frequentemente encontrados.

Tabela 2-1- Ensaios Não Destrutivos de Concreto - Ponto de Interesse/Tipo de Dano

| Item/objeto de teste | Descrição |
|----------------------|--|
| 1 | Fissuração perpendicular ao betão de superfície |
| 2 | Fissuração (interna) paralela à superfície do concreto |
| 3 | Deterioração do concreto com o tempo |
| 4 | Camadas de concreto danificadas (fracas) |
| 5 | Propriedades elásticas do concreto (módulo E) |
| 6 | Propriedades elásticas do concreto (módulo G) |
| 7 | Espessura do membro ou camada de concreto |
| 8 | Vazios e heterogeneidades |
| 9 | Localização da armadura |
| 10 | Diâmetro do reforço |
| 11 | Danos ao reforço |
| 12 | Localização de dutos de cabos protendidos |
| 13 | Detecção de vazios em dutos de cabos protendidos |

Fonte: Shaw, 2000

O concreto é um material particularmente complexo e único, pois suas propriedades variam significativamente tanto em nível microscópico quanto macroscópico. Essa variação se deve a diversos fatores, como a resistência específica da mistura, o tamanho e o formato do agregado (a brita e a areia), o teor de umidade e, principalmente, as heterogeneidades inerentes que surgem durante o processo de fundição e cura.

Essa complexidade tem implicações diretas para as técnicas de Ensaios Não Destrutivos (END). Métodos como os sísmicos e o radar, por exemplo, precisam ser rigorosamente calibrados para o tipo específico de concreto e para o ambiente em que a inspeção está sendo realizada. Isso é necessário porque a velocidade das ondas, a energia refletida e os efeitos de amortecimento (atenuação) dessas ondas serão significativamente diferentes e, em muitos casos, imprevisíveis se a calibração não for precisa.

Para auxiliar nesse processo, a Tabela 2-2 fornece uma lista útil das técnicas de END comumente utilizadas, detalhando suas aplicações específicas na inspeção de concreto armado.

Tabela 2-2- Ensaios não destrutivos de concreto - Métodos de ensaios.

| Método de teste | Princípio | Aplicação (cf. Tabela 1) | Capacidade |
|--|---|--------------------------|--|
| UPE | Transmissão e reflexão ultra-sônica P- ou S-Wave. | 1,2,3,4,5,6,7,8,9,12,13 | Espessura máxima do concreto aprox. 1000 mm. Pode detectar um vazio de 100 mm a 300 mm ou um vazio de 200 mm a 500 mm. |
| UPV | Velocidade e atenuação de ondas ultrassônicas | 1,2,3,5,8 | Tempo de viagem da onda apenas. Interpretação exigente e geralmente requer uma técnica complementar. |
| Eco de impacto | Transmissão e reflexão de ondas P transitórias de baixa frequência. | 1,2,3,5,7,8 | Membros de concreto espesso. Casos de problemas simples e geometrias simples. A interpretação pode ser difícil. |
| SASW | Velocidade da onda de Rayleigh com profundidade. | 3,4,6,7,8 | O defeito deve ser relativo grande em relação à profundidade da superfície. Medição de profundidade ilimitada desde que o acesso no Surface seja suficiente. |
| Radar | Transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas. | 9,12 | Máxima penetração em úmido e pesado em concreto armado aproximadamente 150 a 300 mm. |
| DELA | Radiografia de alta energia. | 8,9,10,11,12,13 | Máximo de concreto espessura 1500 mm (7,5MeV Betatron) |
| Tabela 2. Ensaios não destrutivos de betão - Métodos de ensaio | | | |

Fonte: Shaw, 2000.

A Radiografia Industrial (RI), popularmente conhecida como raio-X, é uma técnica fundamental de Ensaio Não Destrutivo (END) empregada para a avaliação da integridade interna de estruturas de concreto armado. Shaw (2004) relata que este método proporciona a geração de uma imagem bidimensional (2D) que mapeia as variações de densidade e espessura dentro do volume inspecionado. O princípio subjacente é a interação da radiação ionizante com o material: os raios-X penetram o concreto e são atenuados em um grau diretamente dependente da densidade e da espessura do objeto atravessado. A intensidade da radiação que emerge do objeto é detectada por um sistema digital de alta resolução, determinando o brilho e o contraste da imagem final. Atualmente, a tecnologia digital permite a produção de imagens de alta qualidade em elementos com espessuras de até 1500 mm. Em uma estrutura de concreto armado homogêneo, a imagem radiográfica reflete as variações de densidade de maneira clara: devido à sua maior densidade, as barras de aço atenuam

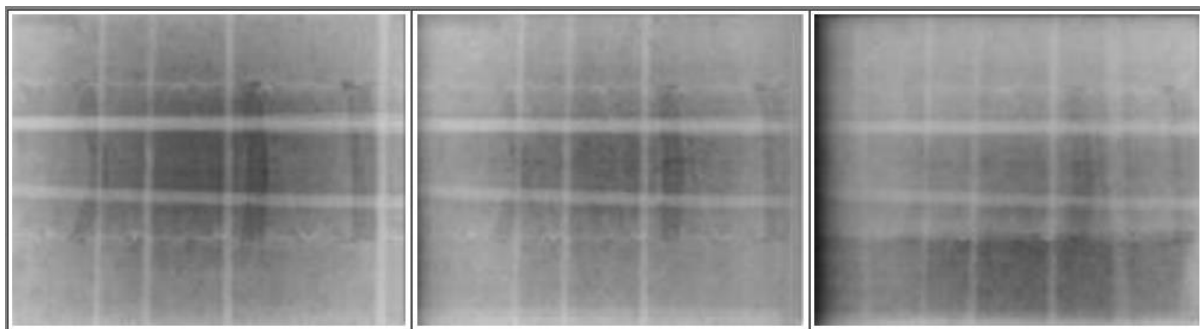
significativamente mais a radiação, aparecendo na imagem como áreas de maior brilho (mais claras). Por outro lado, o concreto circundante é menos denso e aparece em tons mais escuros. Se o concreto contiver falhas de compactação, como poros ou vazios, a ausência de material (baixa densidade) resulta em mínima atenuação da radiação, fazendo com que estas discontinuidades se manifestem como pontos ou áreas de máximo contraste (mais escuras) na imagem.

2.5 Processamento de imagens radiográficas de concreto

Sabe-se que os menores tempos de exposição da radiografia digital e a possibilidade de usar processamento e análise de imagens para realizar medições tornaram interessante a investigação do concreto armado.

Pederson et. al. (2000) realizou um estudo que teve como foco principal determinar o tamanho das cavidades internas presentes em estruturas de concreto armado, dada a preocupação de que esses vazios possam levar à corrosão de elementos cruciais, como os cabos protendidos e as armaduras de aço em contato direto. Para investigar essa capacidade de detecção em condições variadas, o estudo abrangeu uma ampla gama de espessuras de concreto, que incluíram 300 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm e 1200 mm. Dentro dessas amostras, foram simuladas cavidades com diâmetros que variavam de $\varnothing 15$ mm, $\varnothing 20$ mm e $\varnothing 30$ mm, até $\varnothing 40$ mm, $\varnothing 50$ mm, $\varnothing 60$ mm e $\varnothing 70$ mm. Adicionalmente, é importante notar que as imagens resultantes dessa investigação, que demonstram a detecção dessas cavidades, podem ser visualizadas na Figura 3, a qual apresenta especificamente os resultados obtidos para as espessuras de 300 mm, 600 mm e 800 mm com as cavidades menores de $\varnothing 15$ mm, $\varnothing 20$ mm e $\varnothing 30$ mm.

Figura 2-24- Imagens de concreto armado em diferentes espessuras (da esquerda 300 mm, 600 mm e 800 mm). Cavidades com tamanho de $\varnothing 15$ mm, $\varnothing 20$ mm e $\varnothing 30$ mm podem ser vistas em cada imagem.

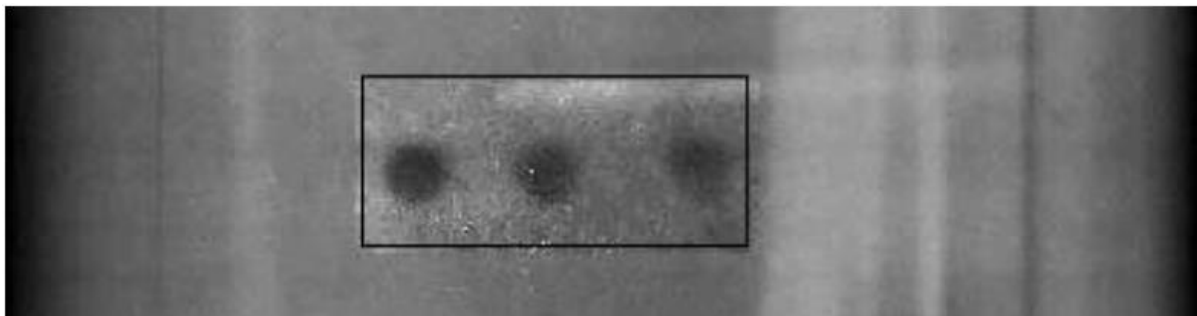


Fonte: Pederson et.a., 2000.

Todas as imagens radiográficas resultantes do estudo foram submetidas ao processamento digital utilizando o software MUSICA, com uma especial ênfase no aprimoramento do contraste. Para que fosse possível comparar o desempenho do contraste em função da espessura do concreto, os filmes radiográficos foram propositalmente expostos para atingir uma densidade óptica semelhante à das imagens digitais. Os resultados revelaram que o contraste é significativamente maior para as placas de imagem digitais quando comparadas ao filme (Agfa FD8p) em todas as amostras testadas; contudo, a diferença de contraste entre as duas tecnologias se acentua notavelmente à medida que a espessura do concreto aumenta. Em termos práticos de detecção, isso significa que não é possível identificar o mesmo tamanho mínimo de cavidade utilizando o filme tradicional em comparação com a capacidade demonstrada pelas placas de imagem digitais.

Para demonstrar visualmente a notável capacidade de detecção (ou detectabilidade) das cavidades utilizando a tecnologia de placas de imagem digitais, a Figura 4 apresenta um exemplo muito ilustrativo. Esta imagem exhibe uma seção de concreto armado com a espessura máxima de 1200 mm, na qual foram inseridas três cavidades com o mesmo diâmetro $\varnothing 20$ mm, mas com diferentes profundidades: 15 mm, 20 mm e 40 mm. O ponto chave dessa demonstração é que, mesmo nessa espessura extrema, todas as três cavidades podem ser detectadas com facilidade pelas placas de imagem, provando a eficácia do método digital em estruturas espessas.

Figura 2-25- Concreto armado de 1200 mm de espessura com três cavidades de tamanhos: $\varnothing 20$ mm com profundidades de 15 mm, 20 mm e 40 mm vistas da direita para a esquerda.



Fonte: Pederson et.a., 2000.

Para realizar a radiografia do concreto, foi utilizado um betatron de 7,5 MeV como fonte de raios-X de alta energia. O estudo revelou que o tempo de exposição necessário para obter uma imagem varia significativamente dependendo se é utilizada a tecnologia de placas de imagem digitais ou o filme radiográfico FD8p, e essa diferença se altera conforme a espessura do concreto armado. Para detalhar essa relação e permitir a consulta de dados, a Tabela 2-3 mostra de forma completa todos os parâmetros de exposição e de varredura que foram aplicados para cada uma das cinco espessuras de concreto testadas.

Tabela 2-3- Tempos de exposição para filme e placa de imagem, incluindo o tempo de resfriamento para o betatron em função da espessura do concreto armado.

| Espessura (mm) | Tempo de exposição filme (seg.) | Tempo de exposição IP (seg.) | Resolução de digitalização (μ , m) | Sensibilidade de varredura |
|----------------|---------------------------------|------------------------------|---|----------------------------|
| 300 | 40 | 24 | 105 | 16 |
| 600 | 300 | 159 | 210 | 16 |
| 800 | 1017 | 468 | 210 | 16 |
| 1000 | 3516 | 1380 | 210 | 16 |
| 1200 | 14400 | 4500 | 210 | 16 |

Fonte: Pederson et.a., 2000.

Ao analisar os resultados de exposição apresentados na Figura 2-25, observa-se um ponto crucial na comparação das tecnologias: enquanto os tempos de exposição aplicados resultaram em um nível de cinza (que representa a brilho e a qualidade de exposição) aproximadamente constante e satisfatório nas placas de imagem digitais, o mesmo não ocorreu com o filme radiográfico FD8p. Para o filme, a densidade óptica diminuiu (ficou mais "claro") à medida que a espessura do concreto

aumentava. Isso é evidenciado pelo fato de que mesmo os longos tempos de exposição de 3516 e 14400 segundos não foram suficientes para atingir a densidade ideal de 2,5 no filme. No pior dos casos (o tempo de 14400 segundos), a densidade resultante no filme estava no limite mínimo aceitável para que a imagem pudesse ser avaliada.

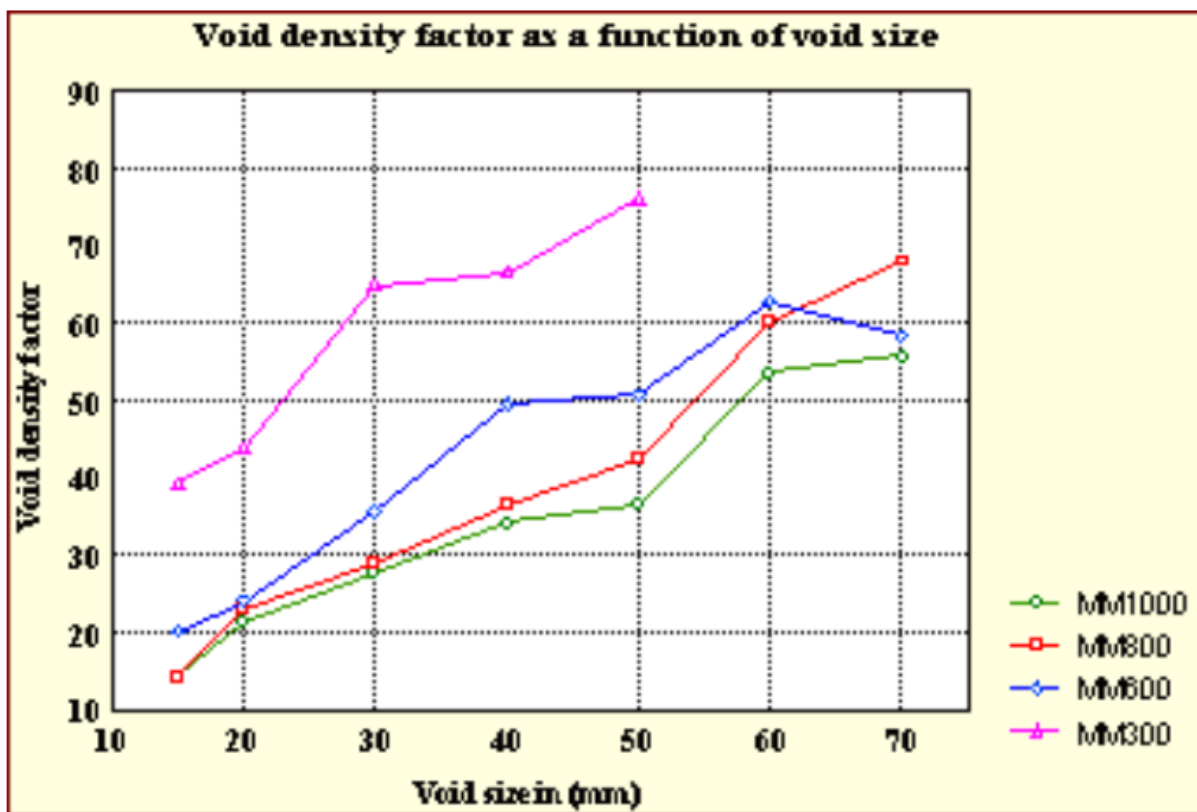
Para estabelecer se existe uma relação previsível entre a espessura do concreto e a capacidade de detectar o tamanho da cavidade, os pesquisadores calcularam um novo parâmetro chamado Fator de Densidade de Vazios (do inglês, *void density factor* ou VDF). Este fator foi calculado para todos os tamanhos de vazios estudados e para quatro espessuras diferentes de concreto. O VDF é, portanto, a métrica utilizada para quantificar a visibilidade das falhas e está definido como:

$$vdf = \frac{D_v - D_c}{D_c} \cdot 1000 \quad (1)$$

onde D_v é o valor do nível de cinza do vazio no meio do vazio e D_c é o valor do nível de cinza correspondente ao lado do vazio. Este último é encontrado como uma média do valor do nível de cinza em ambos os lados do vazio na mesma posição horizontal onde o valor do nível de cinza do vazio é medido.

Para visualizar e entender a relação estabelecida, o Fator de Densidade de Vazios (VDF), que mede a visibilidade das cavidades, foi plotado graficamente em função do tamanho do vazio. Essa representação é feita separadamente para as quatro diferentes espessuras de concreto estudadas, e o resultado pode ser analisado detalhadamente na Figura 2-26.

Figura 2-26- Fator de densidade de vazio plotado em função do tamanho do vazio para 4 espessuras diferentes de concreto.



Fonte: Pederson et al., 2000.

As investigações de concreto armado com radiografia digital mostraram:

- maior contraste alcançável com radiografia digital em comparação com Agfa (FD8p) e filme Kodak para todas as espessuras investigadas (300 a 1200 mm)
- Maior capacidade com placas de imagem em comparação com o filme: 1000 mm (r) 1200 mm
- Avaliação de detalhes mais fácil com radiografia digital para espessuras > 600 mm
- tempos de exposição em geral 2-4 vezes mais rápidos do que para o filme FD8p, por exemplo, 75 min. com um betatron de 7,5 MeV a uma espessura de 1200 mm em comparação com 240 min para filme FD8p (uma densidade de 2 não pode nem ser esperada em filme com esse tempo de exposição)
- em comparação com o filme, é possível atender aos requisitos da Agência de Energia Nuclear: detectabilidade por raios-X de um furo de 20 mm (porosidade) em concreto de 1000 mm de espessura (até mesmo possível

detectar furo de 15 mm em concreto de 1200 mm). O $\varnothing 20$ mm está no limite para filme

- É possível determinar a profundidade aproximada de um vazio com o fator de densidade de vazios
- a determinação das dimensões, do posicionamento, etc., é muito mais rápida do que para o filme

2.6 Processamento de imagens digitais usando metodologia de coloração sintética.

Imagens coloridas estão envolvidas em todos os aspectos de nossas vidas, onde elas desempenham um papel importante nas atividades cotidianas, como televisão, fotografia e impressão. A percepção de cores é um fenômeno fascinante e complacente que tem ocupado o interesse de cientistas, psicólogos, filósofos e artistas por centenas de anos. Neste capítulo, nos concentramos nos aspectos técnicos das cores que são mais importantes para trabalhar com imagens de banco de dados digitais. Nossa ênfase será em entender as várias representações de cores e utilizá-las corretamente ao programar. (Burger, 2009)

O esquema de cores RGB codifica as cores como combinações das três cores primárias: vermelho, verde e azul. Esse esquema é amplamente usado para transmissão, representação e armazenamento de imagens coloridas em dispositivos analógicos, como aparelhos de televisão e dispositivos digitais, como computadores, câmeras digitais e scanners. Por esse motivo, muitos programas gráficos e de processamento de imagens usam o esquema RGB como representação interna de imagens coloridas, e a maioria das bibliotecas de idiomas, incluindo as APIs de criação de imagens do Java, o utilizam como representação de imagem padrão.

RGB é um sistema de cores aditivas, o que significa que todas as cores começam com preto e são criadas adicionando as cores primárias. Você pode pensar na formação de cores neste sistema como ocorrendo em uma sala escura onde você pode sobrepor três feixes de luz - um vermelho, um verde e um azul - em uma folha de papel branco. Para criar cores diferentes, você modificaria a intensidade de cada um desses feixes de forma independente. A intensidade distinta de cada feixe de cores primárias controla a sombra e o brilho da cor resultante. As cores cinza e branco são

criadas misturando os três feixes de cores primárias na mesma intensidade. Uma operação semelhante ocorre na tela de um monitor de computador colorido, baseado em CRT, onde minúsculos pontos próximos de fósforo vermelho, verde e azul são simultaneamente excitados por um fluxo de elétrons para níveis de energia distintos (intensidades), criando uma imagem de cor aparentemente contínua.

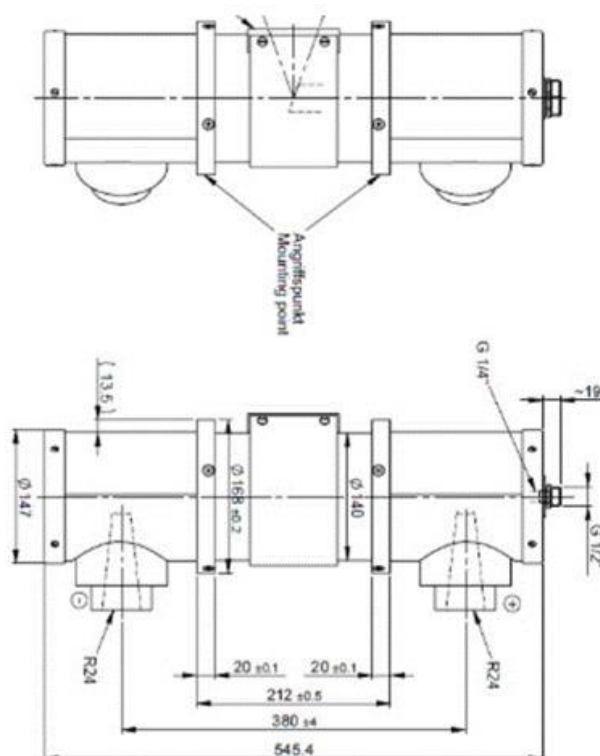
Como doutorando, participei do projeto sobre o aprimoramento de detalhes e realce das bordas das imagens radiográficas utilizando coloração sintética sob a coordenação da professora Candeias (CANDEIAS et al., 2019). A imagem em estudo foi obtida através de radiografia computadorizada utilizando Betatron em sua potência máxima de 7,5 MeV a uma distância de 1 metro do objeto. Para minimizar o efeito da dispersão de raios-X e otimizar a qualidade da imagem radiográfica, uma chapa de chumbo de 2 mm de espessura foi posicionada atrás do tubo de raios-X, conforme ilustrado na Figura 2-27. A Figura 2-28 apresenta um esquema do tubo de raios-X utilizado como objeto de estudo.

Figura 2-27- (Esquerda) Uma foto do tubo de raios-X e (direita) o radiador do Betatron localizado a 1 metro do tubo de raios-X contendo chumbo dentro para obter uma imagem radiográfica com raios-X de 7,5 MeV.



Fonte: Candeias, et. al., 2019.

Figura 2-28- Os esquemas do tubo de raios-X são apresentados na Figura 2-26.



Fonte: Candeias, et. al., 2019.

O aprimoramento digital da imagem segue dois passos:

- Geração de Imagem Sintética Colorida: A imagem original em escala de cinza é transformada em uma imagem sintética colorida, utilizando o método descrito por Daily (1983).
- Análise de Componentes Principais (PCA): A Análise de Componentes Principais (PCA) é aplicada à imagem sintética colorida. Isso gera três bandas de saída não correlacionadas: PC1 (Componente Principal 1), PC2 (Componente Principal 2) e PC3 (Componente Principal 3). Com esse processamento, é possível observar detalhes internos do objeto de forma mais clara.

A metodologia apresentada neste trabalho foi desenvolvida utilizando o software ENVI.

De acordo com Daily (1983), uma imagem em escala de cinza pode ser convertida em uma imagem sintética colorida aplicando filtros passa-alta e passa-baixa. Em seguida, os componentes H (Matiz), S (Saturação) e V (Valor) do espaço

HSV são obtidos e posteriormente transformados para o espaço RGB (R - Vermelho, G - Verde e B - Azul) para gerar a imagem colorida.

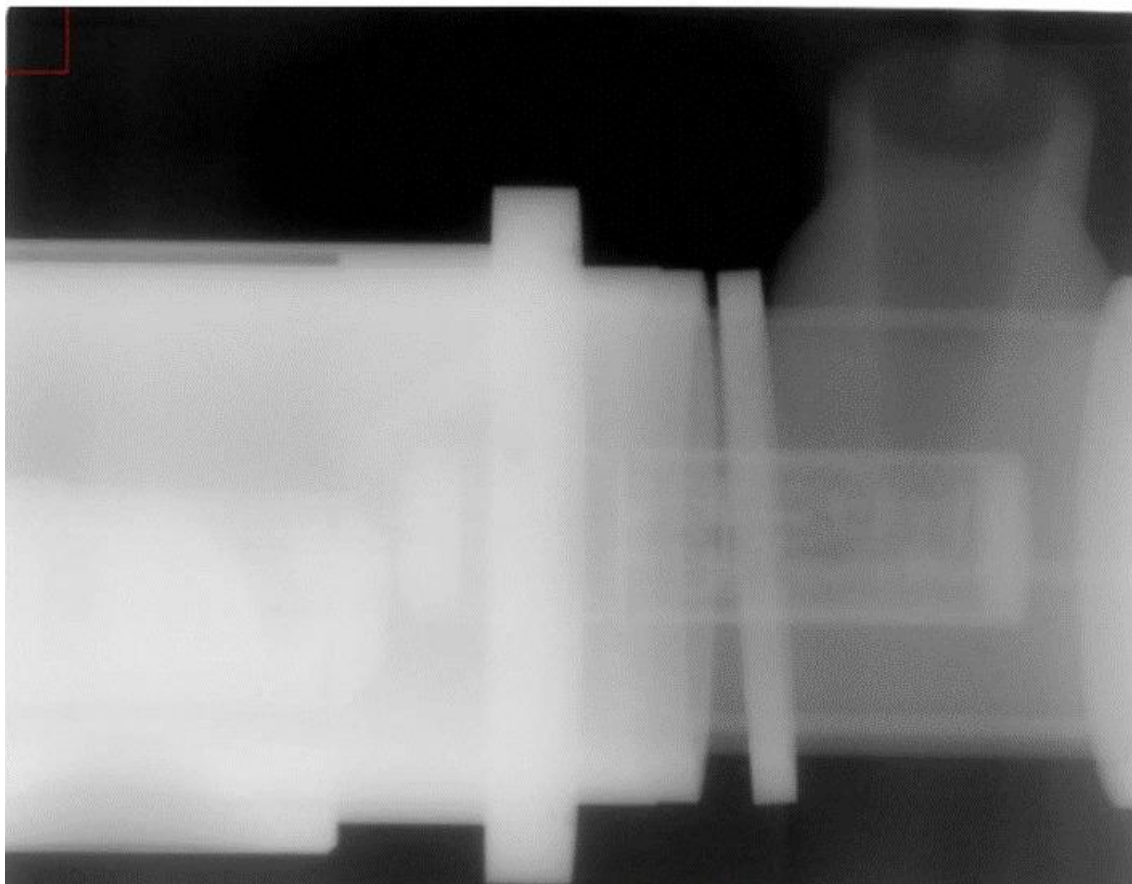
Assume-se que a informação de baixa frequência pode ser atribuída ao componente H, enquanto a informação de alta frequência pode ser atribuída ao componente V. Um nível fixo para o componente S pode ser utilizado. O espaço HSV é então mapeado para o espaço RGB, gerando a imagem colorida. Vale ressaltar que o software ENVI já possui esses passos implementados.

De maneira geral, os Componentes Principais (PCs) são empregados para obter componentes não correlacionados, separar componentes de ruído e reduzir o tamanho dos conjuntos de dados. Os PCs são combinações lineares das bandas originais. Para n bandas, n componentes principais podem ser obtidos. Neste caso específico, como temos n igual a três (as três bandas RGB), três componentes principais (PC1, PC2 e PC3) são gerados.

A primeira componente principal (PC1) concentra a maior parte da variância dos dados das bandas, enquanto a segunda componente (PC2) contém a segunda maior variância, e assim sucessivamente. As últimas bandas de PC tendem a ser mais ruidosas, pois contêm pouquíssima variação, sendo grande parte dela atribuída ao ruído na fonte de dados espectrais.

A Figura 2-29 apresenta o resultado da imagem de raios-X obtida com o Betatron operando para gerar uma energia de raios-X de 7,5 MeV, a uma distância de 1 metro da fonte de radiação até o objeto.

Figura 2-29- Resultados da Imagem Radiográfica do Tubo de Raios-X Obtida Originalmente.

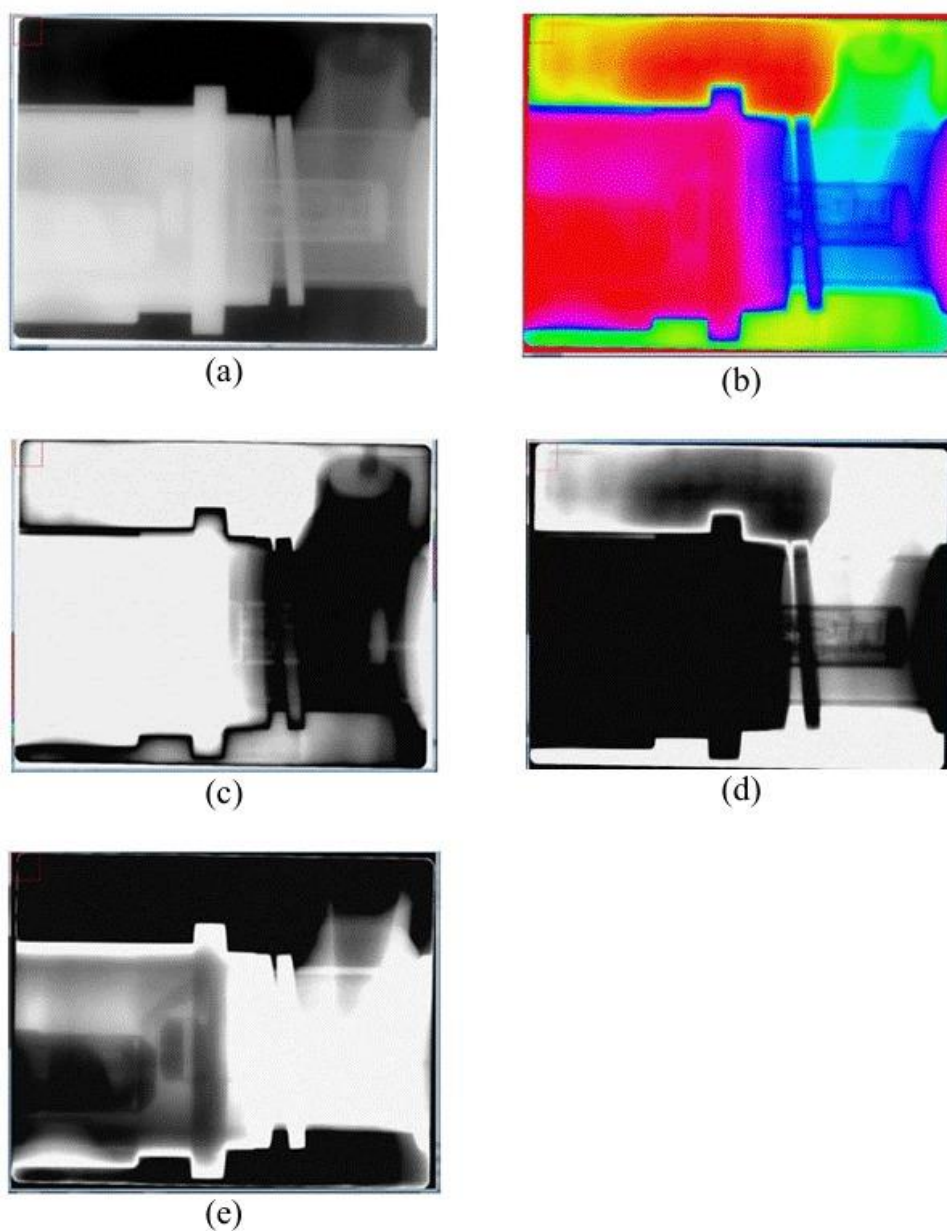


Fonte: Candeias, et. al., 2019.

As partes internas dos objetos não são claramente visíveis na imagem original. Portanto, foi aplicado um aprimoramento digital da imagem radiográfica com o objetivo de apresentar mais detalhes internos do objeto.

Aplicando a metodologia apresentada por Daily (1983), a imagem em escala de cinza (Figura 2-30) é transformada em uma imagem sintética colorida (Figura 2-30 (b)) e sua decomposição nas bandas RGB: banda R (Figura 2-30 (c)), banda G (Figura 2-30 (d)) e banda B (Figura 2-30 (e)). Essas bandas mostram as bordas das partes internas do tubo de raios-X com um realce muito mais claro.

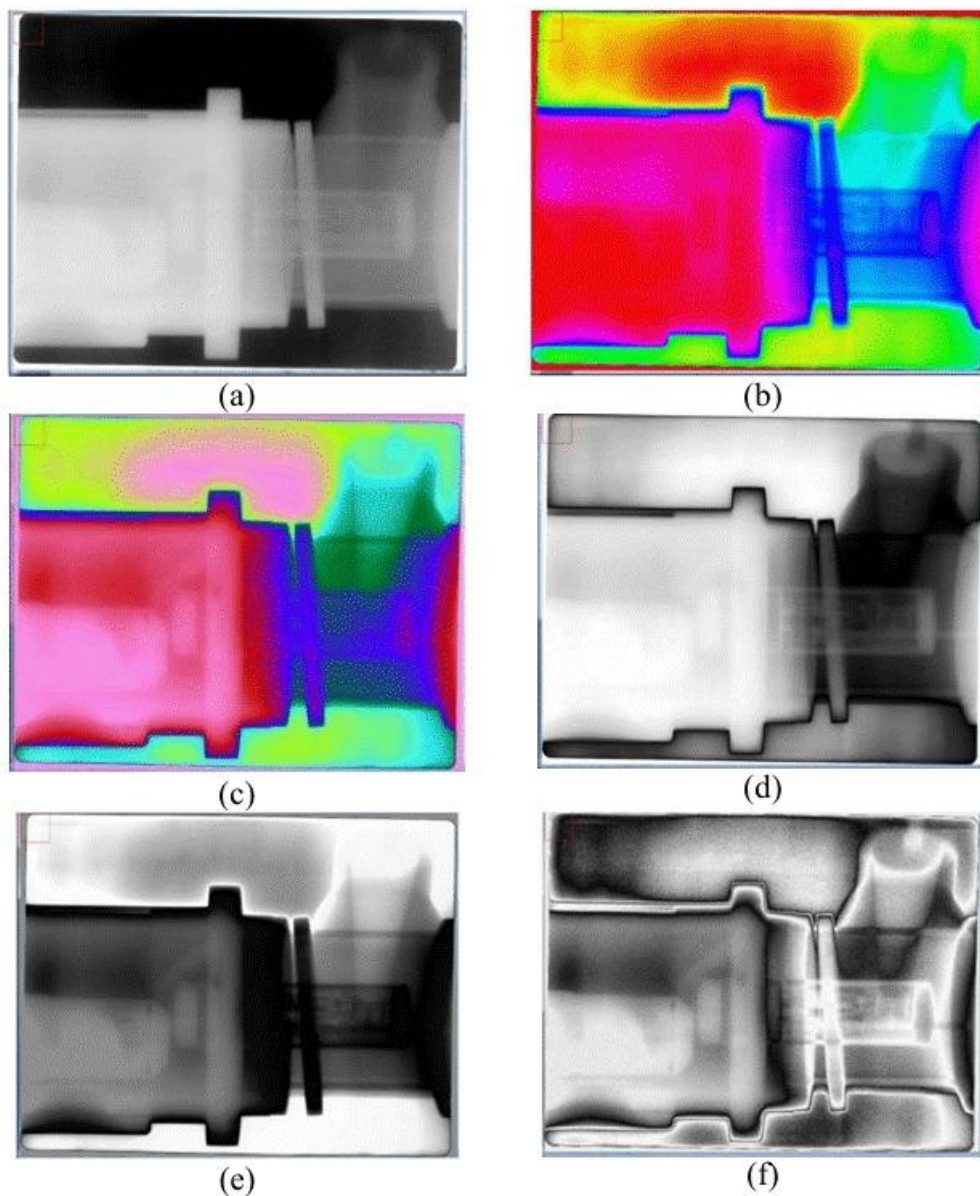
Figura 2-30- Imagem Colorida Sintética e Sua Decomposição em Bandas. (a) Imagem original em escala de cinza, conforme obtida. (b) Imagem RGB gerada com base na metodologia de Daily (1983). (c) Banda R (Vermelha). (d) Banda G (Verde). (e) Banda B (Azul).



Fonte: Candeias, et. al., 2019.

Uma imagem RGB dos Componentes Principais PC1PC2PC3 (Figura 2-31 (c)) e as imagens PC1 (Figura 2-31 (d)), PC2 (Figura 2-31 (e)), PC3 (Figura 2-31 (f)) apresentaram uma visualização interna e bordas dos objetos superiores às da imagem original (Figura 2-31 (a)).

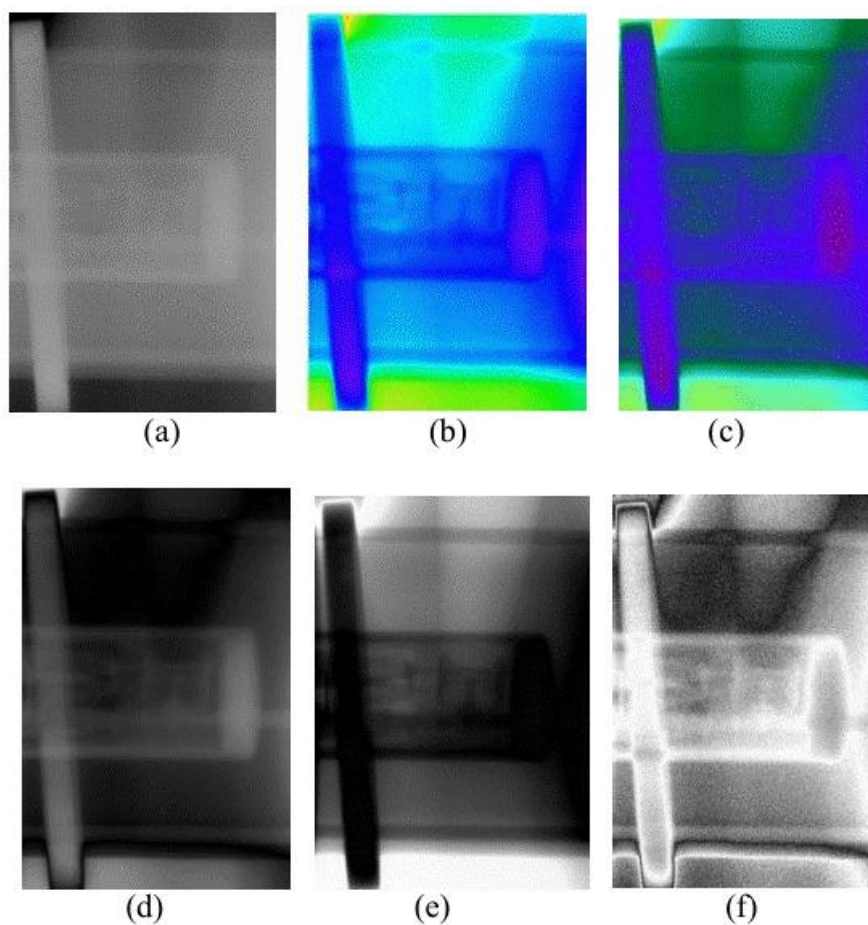
Figura 2-31- Imagem Original Obtida, Imagem Colorida Sintética e Componentes Principais. (a) Imagem original, tal como obtida. (b) Imagem RGB sintética. (c) Imagem RGB dos Componentes Principais (PC1PC2PC3). (d) PC1 (Primeiro Componente Principal). (e) PC2 (Segundo Componente Principal). (f) PC3 (Terceiro Componente Principal).



Fonte: Candeias, et. al., 2019.

A Figura 2-32 apresenta um zoom da Figura 2-31 para permitir a visualização dos detalhes internos, onde mais bordas foram definidas. Os Componentes Principais PC2 e PC3 demonstram de forma mais clara os detalhes internos e as bordas.

Figura 2-32- Ampliação da Imagem Original Obtida, Imagem Colorida Sintética e Componentes Principais. (a) Imagem original. (b) Imagem RGB sintética. (c) Imagem PC1PC2PC3. (d) PC1. (e) PC2. (f) PC3.



Fonte: Candeias, et. al., 2019.

A imagem colorida sintética e suas bandas R, G e B revelaram uma boa visualização interna e bordas aprimoradas das partes internas dos objetos. Além disso, com a análise de componentes principais, as bandas não correlacionadas geradas (PC1, PC2 e PC3) mostraram diferentes detalhes internos do objeto analisado.

2.7 Radiografia de Alta Energia para Inspeção de Estrutura de Concreto Armado

Existem, no mercado, sistemas de radiografia para inspecionar concreto armado com gamagrafia utilizando isótopo de cobalto-60 (1,17 MeV e 1,33 MeV e meia vida de 5,26 anos), que é uma fonte de radiação de emissão constante de raios gama, mas limita-se a uma espessura 50 cm². Entretanto, pela natureza de baixa sensibilidade dos filmes industriais empregados em gamagrafia, utiliza-se isótopo de cobalto-60 de altíssima atividade, isto é, acima de 100 Ci (Curie). Do ponto de vista de radioproteção, a utilização de tal sistema exige balizamento extremamente grande de área, raios superiores a 300 metros em torno do local e os operadores estão sujeitos à exposição de alta dose de radiação. Outro fator crítico do sistema de radiografia com cobalto-60 é o transporte de radioisótopo que é de alta complexidade e requer um cuidado e um treinamento especial, muito diferente de uma fonte de raios-x. Ademais, em função da energia e intensidade requerida para radiografar grandes estruturas, a dimensão da fonte do radioisótopo é dezenas de milímetros, que influência na qualidade da imagem. Estas características tornam a sua utilização bastante limitada para os propósitos de um projeto como o propósito deste.

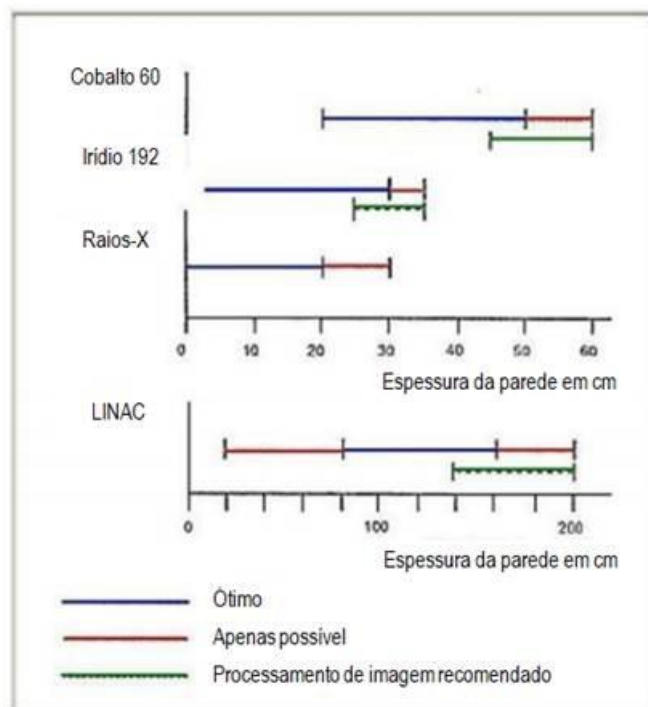
Como já mencionado, o concreto armado tem sido largamente utilizado na construção de torres de linhas de transmissão no país de extra-alta tensão de até 500 kV e em torres de aço auto-portante de 230 kV. Basicamente, três fontes de radiação ionizante têm sido utilizadas para a inspeção e monitoramento de concreto armado por radiografia: raios-gama de radioisótopo de cobalto-60 e raios-X de alta energia de acelerador linear (LINAC) e fonte raios-X bremsstrahlung (HALMSHAW, 1995).

Tabela 2-4- Fontes de radiação para diferentes espessuras de concreto

| Fonte | Espessura aproximada do concreto | |
|----------------------------|----------------------------------|---------|
| | Mínimo | Máximo |
| Co-60 | 125 mm | 500 mm |
| Ir-192 | 25 mm | 250 mm |
| Raios-X de 18 MeV do Linac | 500 mm | 1600 mm |

Fonte: IAEA, 2002.

Figura 2-33- Faixa de espessura de concreto ótimo, apenas possível e processamento de imagem recomendado quando inspecionado com diferentes fontes de radiação.



Fonte: Redmer, et al., (2003).

A seguir é descrita os métodos radiográficos para inspeção de concreto armado utilizando as três fontes de radiação mencionadas acima. Das três fontes de radiação, gamagrafia é a mais antiga (FORRESTER, 1960), que começou a ser utilizada a partir do final da década de 1950.

O uso da potencialidade de gamagrafia para radiografia industrial foi anunciado em 1943 pelo C. Croxson numa reunião de Grupo de Radiologia Industrial do Instituto de Física da Universidade de Loughborough, na Inglaterra (NATURE, 1943). Uso de gamagrafia para inspeção de junta soldadas e fundição de metais foi logo estabelecida, mas somente no final de década de 50 começou a ser utilizado para inspeção de concreto armado.

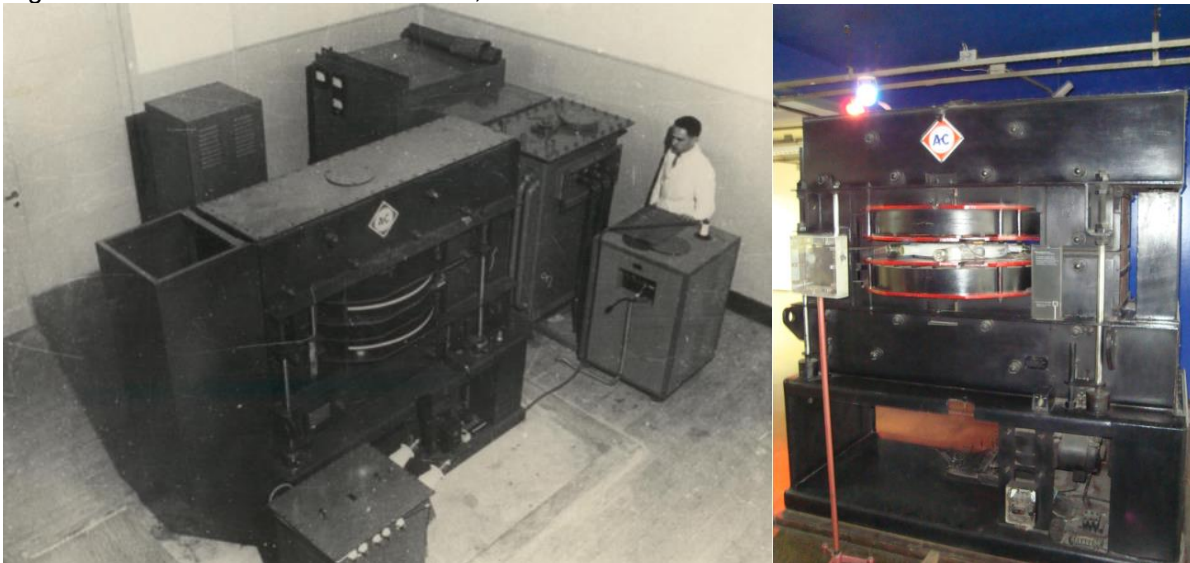
A fonte de raios-X de alta energia acima de 1 MeV denominado de betatron tem sido utilizada para radiografia industrial de concreto. O betatron produz radiografias de alto contraste, sensibilidade e resolução, proporcionando um substituto ideal para radioisótopos (tais como o cobalto-60), que são caros e fornecem uma imagem de qualidade inferior. O betatron portátil é um acelerador de elétrons, compacto-circular, que produz um feixe de raios-X de alta energia direcional. Betatron de compactos são

utilizados no controle radiográfico de materiais de qualidade de produtos sob condições não estacionárias, tais como a construção civil.

Uma das suas principais vantagens do betatron é o padrão mais estreito da direção do feixe, o que resulta num perigo de radiação nas operações sob condições não estacionárias. O betatron fornece maior nitidez da imagem radiográfica devido ao pequeno tamanho do ponto focal. É considerada de fácil transporte, operar e manter, além de garantir um baixo volume de defeitos nas imagens de raios-X graças ao sistema de dosimetria remota. O conjunto que constitui a fonte de raios-X Betatron é composta de (i) acelerador de partículas; (ii) conversor de potência e (iii) painel de controle.

No Brasil, o primeiro betatron foi trazido ao país pelo Prof. Marcelo Damy e instalado no Departamento de Física da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo (atualmente Instituto de Física da USP) em 1949. Hoje, este betatron encontra-se em exposição na Estação Ciência (WIKIPÉDIA, 2019).

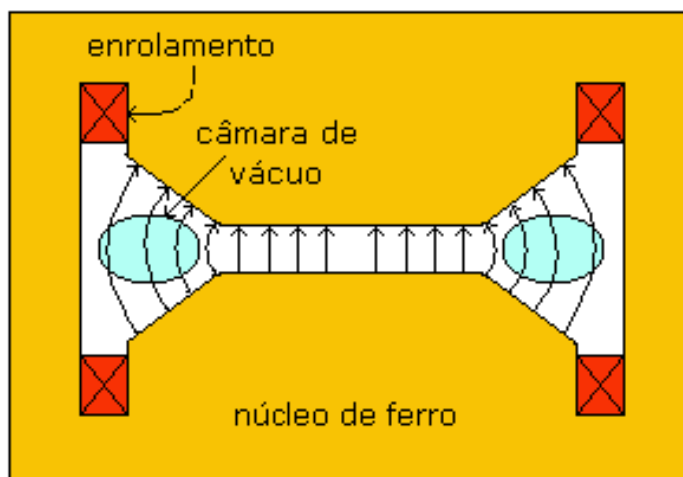
Figura 2-34- Primeiro betatron no Brasil, no Instituto de Física da USP – Universidade de São Paulo.



Fonte: Banco de Dados Folha, 1952.

O betatron é um acelerador de elétrons por indução circular. A palavra betatron deriva do fato de que os elétrons de alta energia são, frequentemente, chamados de partículas beta.

Figura 2-35- Esquema do interior do Betatron.



Fonte: Wikipédia, 2025

Uma corrente alternada fluindo no enrolamento primário provoca o surgimento de um campo magnético variável sobre a câmara. Este campo magnético variável induz um campo elétrico (lei de Faraday) tangencial à câmara, gerando uma força que acelera os elétrons numa trajetória circular.

Para garantir que trajetória seja estável, é necessário garantir que:

$$\theta_0 = 2\pi r_0^2 H_0 \quad (2)$$

onde:

θ_0 é o fluxo magnético na área que compreende a trajetória dos elétrons,

r_0 é o raio da órbita do elétron,

H_0 é o campo magnético na posição r_0

O Campo H_0 corresponde à metade do campo magnético médio sobre toda a área da órbita, ou seja:

$$H_0 = \frac{1}{6} \frac{\theta_0}{\pi r_0^2} \quad (3)$$

Com respeito à aplicação prática do betatron, historicamente foi empregado nos experimentos de física de partículas por prover feixes de elétrons de alta energia de até 300 MeV. Por outro lado, descobriram que se o feixe de elétrons é direcionado a um alvo de metal, por exemplo, tântalo, o betatron pode ser usado como uma fonte de raios-X de alta energia, e ser usado na indústria e aplicação médica

(historicamente, em oncologia). Uma versão compacta de betatron tem sido desenvolvido, comercializado e utilizado para prover raios-X duro de alta energia via desaceleração de feixe de elétron por um alvo metálico, como mostra a foto na Figura 2-36. Tabela 2-5 mostra as especificações técnicas de duas fontes de betatron comerciais.

Figura 2-36- Equipamentos que compõem o betatron e uma tabela de especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.



Fonte: JME, 2010

Tabela 2-5- Especificações Técnicas de betatrons

| | PXB 2,5 | PXB 6 | PXB 7,5 |
|---|-------------------------------|-------------------------|------------------|
| Seletor de energia de saída de raios-x | 2,5 MeV | 2 a 6 MeV | 2 a 7,5 MeV |
| Taxa de dose a 1m (ar) | 0,7 R por minuto | 3R por minuto | 5R por minuto |
| Tamanho do ponto focal | 0,2 x 2 mm | 0,2 x 1,0 mm | 0,3 x 1,6 mm |
| Ciclo de trabalho em 20° C (por hora) | - | 100% | 75% |
| Ângulo de propagação do feixe de radiação | - | 26 graus | 22 graus |
| Sensibilidade radiográfica | 1 – 1,5% | Até 0,5% | Tipicamente 1% |
| Entrada de energia AC | - | 110/240V 50/60Hz | 115/220V 50/60Hz |
| Dimensões e peso Acelerador | 44 x 30 x 15 cm 30kg | 60 x 40 x 23 cm 90kg | 70 x 43 x 35 cm |
| Conversor de energia | 41,5 x 20,5 x 24 cm 10.5kg | 59 x 38 x 36 cm 60kg | 56 x 48 x 38 cm |
| Painel de controle | 23,5 x 20 x 11,5 cm 1.5kg | 36 x 32 19 cm 7 kg | 20 x 13 x 4 cm |
| Peso total do sistema | | 190 kg | 210 kg |

Fonte: JME, 2010

Pugliesi e Andrade (1997) relatam que a Radiografia Digital por Nêutrons (*Neutron Radiography* - NR) é também empregada para a visualização de fissuras em concreto. Para otimizar a detecção das fissuras, as amostras são impregnadas com um agente de contraste, uma substância de elevada capacidade de absorção de nêutrons.

Em termos de resolução, as radiografias digitais por nêutrons demonstraram resultados superiores na visualização de fissuras. Essa superioridade foi observada em comparação tanto com as radiografias digitais de raios-X quanto com as radiografias analógicas obtidas pela própria técnica de NR nas mesmas amostras.

As principais inferências advindas dos resultados obtidos são:

- Elevada Sensibilidade: A Radiografia por Nêutrons (NR), mesmo utilizando filmes de emulsão convencional, demonstra elevada sensibilidade para a detecção de fissuras, o que é corroborado pela literatura.
- Otimização Digital: O processamento digital das imagens otimiza a visualização das fissuras, apresentando ganhos em comparação direta aos resultados brutos obtidos nos filmes.
- Melhoria de Resolução: O limite mínimo de espessura discernível para os depósitos de nitrato de gadolínio nas fissuras, empregando a técnica NR, é de aproximadamente 0,6 μm . Este valor representa uma melhoria de sensibilidade de cerca de 25 vezes em relação ao avaliado para a radiografia convencional.

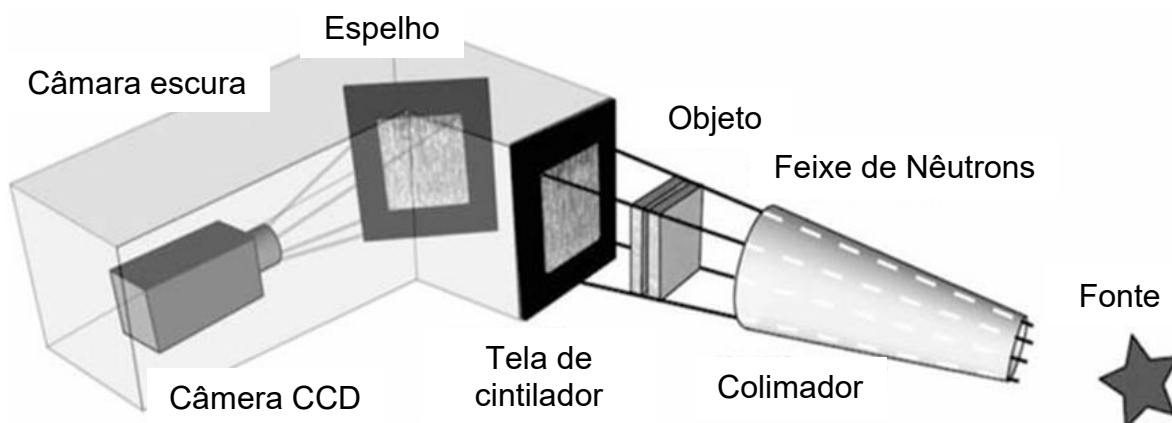
Ainda sobre a inspeção de concreto, Zhang et al. (2011) relata que a durabilidade de estruturas de concreto armado é frequentemente comprometida pela ingressão de água e espécies dissolvidas no compósito cimentício. Este processo acarreta a deterioração do concreto e a consequente iniciação da corrosão da armadura de aço. Para a investigação desses fenômenos, a radiografia de nêutrons apresenta-se como uma técnica não destrutiva avançada, provendo alta resolução espacial e sensibilidade excepcional.

O potencial de aplicação da radiografia por nêutrons em tempo real foi demonstrado inicialmente por Berger (1965). Atualmente, esta técnica abrange um vasto espectro de fenômenos e materiais passíveis de investigação. Suas aplicações englobam, entre outros, a corrosão de componentes de alumínio no setor aeroespacial, o transporte e distribuição de água em sistemas biológicos (plantas), o

estudo de combustíveis nucleares, a análise de processos de combustão em motores e o monitoramento da migração hídrica em materiais de construção civil.

O princípio subjacente à radiografia de nêutrons baseia-se no registro da radiação que transpassa um espécime por meio de um detector sensível à posição. A configuração experimental fundamental é ilustrada na Figura 2-37.

Figura 2-37- Representação esquemática do arranjo experimental para radiografia de nêutrons.



Fonte: Zhang et al., 2011.

Uma vez que a atenuação da radiação é função da espessura e da densidade do material, as imagens de nêutrons fornecem informações qualitativas e quantitativas sobre a composição e a estrutura interna do objeto. É importante notar, no entanto, que a imagem constitui a projeção bidimensional do objeto tridimensional; consequentemente, a informação adquirida representa uma média ao longo da espessura do espécime, na direção do percurso do feixe.

O feixe de nêutrons foi condicionado por um colimador antes de incidir na amostra de concreto absorvente de água. Os nêutrons que emergiram do objeto foram então registrados por uma tela de cintilação sensível a nêutrons de LiF/ZnS, com uma espessura de 0,25 mm. (ZHANG et al., 2011)

A emissão luminosa gerada pela tela de cintilação foi direcionada por um espelho e registrada por um sistema de câmera CCD de varredura lenta e refrigerada. A fonte de nêutrons, que opera em regime estacionário, é alimentada por um feixe de prótons de 590 MeV gerado por um ciclotron de anel que opera com potência na faixa de megawatts (MW).

Após a aquisição da imagem de transmissão de nêutrons, os dados brutos no formato inteiro não assinado de 16 *bits* foram reorganizados em um sinograma. Em

seguida, foram executados os procedimentos de pré-processamento de imagem, que incluíram: a remoção de ruído (especificamente, artefatos pontuais como manchas brancas), a normalização da exposição, a correção de campo plano e a correção de *background*. Por fim, o sinograma resultante foi armazenado como um volume escalonado no mesmo formato de inteiro não assinado de 16 *bits*.

Para a avaliação quantitativa das imagens, implementou-se uma correção de espalhamento baseada na Função de Pontos Espalhados (*Point Scattering Function* - PScF). Nesta abordagem, a distribuição de espalhamento dos nêutrons — originários de uma fonte pontual e que atravessam a amostra até o detector — é simulada por meio do método de Monte Carlo.

Os parâmetros essenciais para esta simulação incluem o espectro de energia dos nêutrons, a composição material das amostras, a espessura, o tipo de detector e a distância de aquisição. O resultado deste processo é a distribuição de espalhamento na tela do detector, que é a própria PScF.

Visando a aplicação prática, Funções de Pontos Espalhados pré-calculadas para diversas combinações paramétricas estão disponíveis em uma biblioteca de dados. As PScFs radiais simétricas discretas assim geradas são aproximadas por funções contínuas, permitindo sua interpolação para os parâmetros arbitrários inerentes a uma condição experimental real. Finalmente, as radiografias de nêutrons digitalizadas foram submetidas à análise utilizando o *software* IDL.

Zhang et al. (2011), dia que a radiografia de nêutrons constitui uma poderosa técnica não destrutiva para a observação da absorção hídrica pelo concreto. As imagens obtidas foram subsequentemente processadas para determinar distribuições quantitativas de água no material em função do tempo, atingindo-se elevada precisão e alta resolução espacial.

A radiografia de nêutrons irá contribuir para uma compreensão aprofundada dos mecanismos de deterioração do concreto. Além disso, auxiliará na proposição de estratégias para o aprimoramento da durabilidade e o prolongamento da longevidade de estruturas de concreto armado.

2.8 Projeto HEDRAD para Desenvolvimento de Sistemas e Procedimentos de Radiografia Computadorizada

O projeto HEDRad (High Energy Digital Radiography), que recebeu uma subvenção da UE de mais de 1,1 milhões de euros, ocorreu entre outubro de 2008 e fevereiro de 2011. Foi coordenado pela TWI Limited, uma empresa britânica especializada em testes de componentes e materiais, sediada em Cambridge, Reino Unido (EU MONITOR, 2012).

O objetivo principal do HEDRad era desenvolver uma nova geração de sistemas e procedimentos de radiografia computadorizada digital (CR). Isso visava atender aos rigorosos requisitos de detecção de defeitos e testes funcionais em componentes críticos de seção espessa e soldas (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

Os pesquisadores do projeto introduziram duas melhorias cruciais nos processos existentes: (1) o desenvolvimento de sistemas de imagem de raios-X digitais para substituir o filme e (2) um novo software de processamento de imagem (EU MONITOR, 2012).

Um documento detalhando os requisitos técnicos e funcionais do sistema CR a ser desenvolvido no projeto HEDRad foi produzido. Este sistema era composto por vários componentes interdependentes: scanner, placas de imagem, software de imagem digital e o software de média (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

O scanner de radiografia computadorizada (CR) mais adequado foi identificado e modificado para inspeção móvel no local. Além disso, foi projetado e fabricado um suporte de multiplaca que permite a técnica de exposição multi-IP, e um novo software de fusão de dados (NIRA) foi desenvolvido para mesclar e alinhar as imagens obtidas da pilha multi-IP (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

Os procedimentos de medição para as relações específicas de contraste e dispersão foram empregados para encontrar a combinação ideal de tela/filtro e maximizar a qualidade de imagem para aplicações de alta energia. A medição da qualidade da imagem também incluiu indicadores de qualidade de imagem (IQIs) padrão da indústria e o tipo de fio duplex usado na radiografia digital (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

O desafio principal era maximizar o coeficiente de atenuação (μ) e minimizar a taxa de dispersão (k) com o uso de telas frontais ou filtros frontais intermediários. Telas

frontais de 0,6 mm a 1,6 mm de espessura otimizaram o coeficiente de atenuação para altos níveis de energia de placas de imagem de 2,5 MeV a 7,5 MeV e ST-VI. As telas frontais de chumbo mostraram-se eficazes, pois o coeficiente de atenuação é mais alto em 2,5 MeV ou não aumenta mais. A razão de dispersão interna (ISR) também foi reduzida com o aumento da espessura da tela de chumbo para 2,6 mm (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

Telas de cobre (Cu) e ferro (Fe) de 0,6 mm a 0,8 mm de espessura foram consideradas ideais entre os IPs em aplicações multicamadas. Para reduzir a radiação espalhada, telas de chumbo (Pb) ou estanho (Sn) de 1,6 a 2,6 mm de espessura devem ser usadas como telas frontais (filtros intermediários) (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

O desempenho desses procedimentos de alta energia foi comparado com a radiografia convencional em filme no WP4. A comparação focou na detecção de defeitos, na qualidade de imagem alcançada e no teste de funcionalidade de componentes de seção espessa. Na maioria das medições, as técnicas de CR usando o Betatron de alta energia atenderam aos requisitos de qualidade de imagem estabelecidos na ISO-17636 para testes de Classe B. O principal benefício das técnicas de CR foi a redução do tempo de exposição para inspeção de paredes pesadas, resultando em uma economia de até 60% em comparação com a radiografia convencional em filme. Para os ensaios de campo, os procedimentos desenvolvidos foram aplicados a testes funcionais de componentes de seção espessa em uma usina operacional (EUROPEAN COMMISSION, 2013).

Capítulo 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Processo Radiográfico

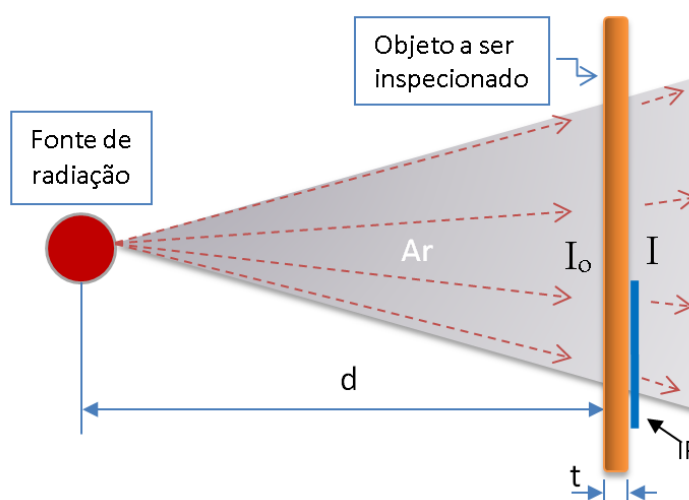
Em radiografia industrial, o princípio do uso da radiação ionizante para inspeção interna de estruturas de um objeto de interesse mantém-se inalterado há mais de 120 anos, que data a descoberta dos raios-X em 1895 pelo físico Wilhelm Conrad Röntgen na Alemanha. Isto é, o objeto a ser inspecionado deve ficar posicionado entre uma fonte de radiação ionizante e um detetor de imagem que pode ser um filme de raios-X, imaging plate (IP), detetor eletrônico, por exemplo, *flat panel*. Este método de obter as imagens radiográficas é conhecido também como método de absorção, onde uma parte da radiação ionizante atravessa por meio do objeto, mas a outra parte é absorvida, espalhada pelo objeto, como é mostrado esquematicamente na Figura 3-1. Atualmente, sabe-se que as radiações ionizantes (raios-X e raios- γ) são ondas eletromagnéticas que possui a mesma natureza da luz visível, mas de comprimento muito menor, da ordem de angstrom, mas com as propriedades interessantes de conseguir atravessar corpos opacos para faixa de luz visível. Ademais, possui a capacidade de ionizar os átomos dos gases, líquido e materiais sólidos. Sabe-se também que a radiação ionizante atravessa com maior facilidade materiais de menor densidade, pois, a capacidade de penetrar em materiais depende basicamente do comprimento de onda da radiação eletromagnética, " λ ", do número atômico do material em inspeção " Z " e da densidade do material, " ρ ". De acordo com a teoria quântica proposta pelo Planck, a energia dos fótons E é dada pela equação (4 e 5).

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (4)$$

$$E(keV) = \frac{12,4}{\lambda(\text{\AA})} \quad (5)$$

Onde “ h ” é constante de Planck, “ ν ” é a frequência da radiação, “ c ” é a velocidade da luz e “ λ ” é o comprimento de ondas da radiação eletromagnética. Na prática, quanto menor o comprimento de onda, maior energia e consequentemente, maior capacidade de penetração.

Figura 3-1- Princípio de radiografia por método de absorção mantido desde a descoberta do raios-X em 1895. Entre uma fonte de radiação ionizante e detetor de imagem, fica posicionado o objeto de interesse com um certo volume e espessura.



Na atualidade, sabe-se que quando a radiação ionizante incide sobre o objeto em inspeção, uma parte atravessa, mas a outra parte é absorvida e espalhada. A relação entre as intensidades de radiação transmitida (I) e incidente (I_0) é dada pela equação (6):

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)t\rho} \quad (6)$$

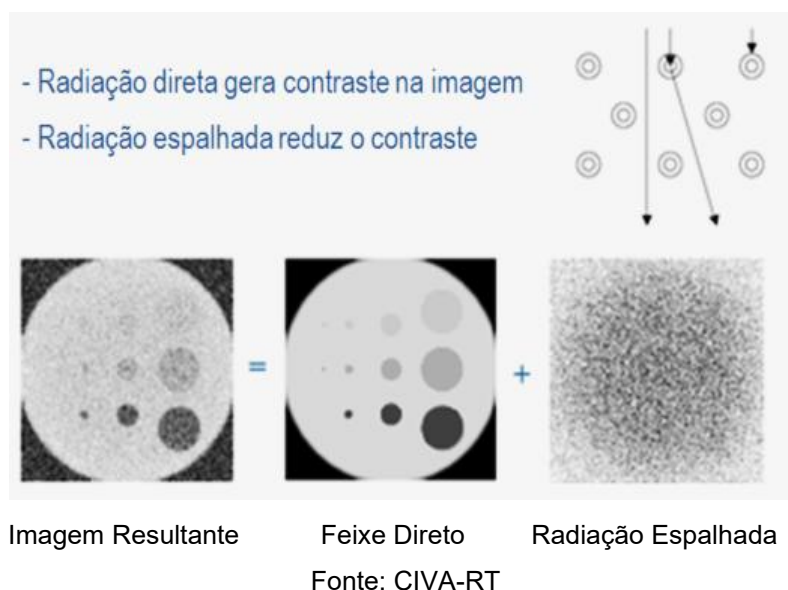
Onde “ t ” é a espessura do objeto e “ μ ” é coeficiente linear de absorção que depende da densidade “ ρ ”, do número atômico “ Z ” do material e do comprimento de ondas “ λ ”.

Para desenvolvimento do presente trabalho, buscou-se a explorar o limite excepcional de sensibilidade do detetor de imagem “Imaging Plate (IP)”, que possui em relação ao filme de raios-X tradicional. Em termos de detectores de radiação ionizante, basicamente existem dois tipos de detectores. Os chamados medidores de pulsos, tais como contador de cintilação e contador proporcional, que medem fótons um a um, são altamente sensíveis e possuem o *dead-time* da ordem de 1 ms. O *dead-time* está relacionado às características construtivas dos detectores e corresponde o

tempo em que o detector deixa de medir os fótons da radiação ionizante que chegam. O segundo tipo de detector é o chamado detector integral, tais como filmes de raios-X e câmara de ionização, que fornecem o total de fótons coletados durante a exposição à radiação ionizante através de medidas de outras propriedades físicas, tais como grau de escurecimento e corrente elétrica. Diferente dos detectores de pulso e proporcional, os detectores integrais não possuem o problema de *dead-time*, mas geram relativamente mais ruídos diminuindo assim a relação S/N (signal/noise) do detector.

Em radiografia, a formação de imagem radiográfica ocorre essencialmente devido ao contraste da passagem do feixe direto da radiação pelo objeto e pela radiação espalhada que é resultante da interação da radiação com a matéria durante a sua passagem, que reduz o contraste. A Figura 3-2 ilustra esquematicamente o efeito da radiação espalhada na passagem de radiação pelo objeto de interesse, que não carrega informações sobre a estrutura interna.

Figura 3-2- Efeito da radiação espalhada.



Jaenisch et. al. diz que os livros didáticos e a literatura especializada em radiografia geralmente abordam a radiação espalhada (ou radiação secundária) como um fator primariamente prejudicial ao processo de obtenção de imagem. Essa visão se deve a dois motivos principais:

- Segurança Radiológica: A radiação espalhada contribui para a dose de radiação absorvida pelo paciente e pelo pessoal técnico, o que é uma preocupação central em segurança radiológica, sendo desejável minimizá-la.
- Qualidade da Imagem (Redução de Contraste): O espalhamento não carrega informação útil sobre a estrutura interna do objeto (anatomia). Em vez disso, essa radiação atinge o detector de forma aleatória, funcionando como um 'véu' de exposição que diminui significativamente o contraste da imagem final, tornando mais difícil distinguir entre diferentes tecidos.

Além disso, é comum a afirmação de que, na análise da nitidez (ou da falta de nitidez/borramento) da imagem radiográfica na prática, a causa principal e dominante é a falta de nitidez inerente (relacionada ao próprio sistema de detecção e ao movimento do paciente) e a falta de nitidez geométrica (causada pelo tamanho do ponto focal do tubo de raios-X, e pela distância entre o objeto e o detector). O efeito do espalhamento sobre a falta de nitidez da imagem no objeto em si, por outro lado, é tipicamente considerado desprezível em comparação com as outras duas fontes de borramento.

De acordo com o Hamshaw (1995) para obter imagem radiografia de alta qualidade, a distância mínima que deve ser mantida entre a fonte de radiação e o detector de imagem, de acordo com a literatura (Hamshaw, 1995) e as normas ISO: 5579, EN-444 e DIN 541111 é estabelecida pela equação (6):

$$\frac{a}{s} = Kb^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

onde “a” é a distância (em mm) entre a fonte de radiação e objeto de interesse, “s” é o diâmetro efetivo do foco da fonte de radiação e “b” a espessura do objeto e “K” é uma constante igual 15 para técnicas de alta sensibilidade (classe B) e igual 7,5 para técnica normal (Classe A). A distância entre a fonte de radiação ao detector é dada por (a + b).

Na prática, há quatro fatores que afetam majoritariamente a qualidade da imagem na radiografia industrial:

- Penumbra geométrica, U_g , devido à dimensão da origem da fonte de radiação (ponto focal),

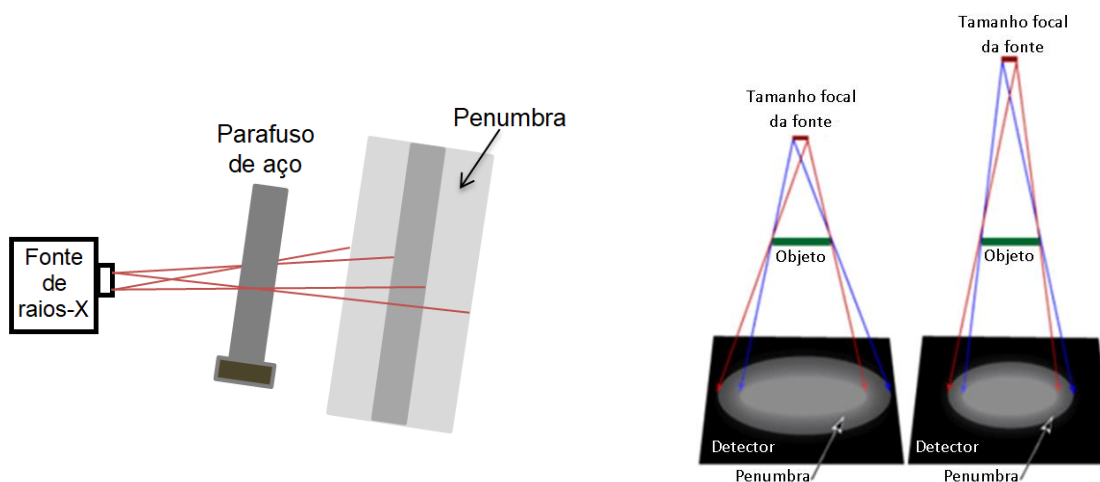
- Penumbra do filme, U_f , devido ao espalhamento dos elétrons no filme,
- Penumbra devido ao intensificador de imagem (écran), U_s , causado pelo espalhamento da luz na camada fluorescente,
- Penumbra devido ao movimento, U_{mv} , devido ao movimento relativo do objeto e filme.

De acordo com Klasens (1946), a penumbra total pode ser representada pela equação (7)

$$U_t = (U_g^3 + U_{mv}^3 + U_f^3)^{1/3} \quad (7)$$

Especificamente, para reduzir o efeito da penumbra geométrica, U_g , visando obter imagem radiográfica de qualidade superior, uma prática interessante é afastar ao máximo a fonte de radiação do objeto sob inspeção, como mostra o esquema da Figura 3-3. Neste caso, há redução da penumbra geométrica, mas ao mesmo tempo intensidade de radiação incidente no detector diminui ao quadrado da distância.

Figura 3-3- Penumbra gerada de foco na origem da fonte de radiação é de dimensão finita. Portanto, para aumentar a capacidade de resolução do sistema radiográfico, afastar a fonte de radiação do objeto de interesse.



3.1.1 Interação da Radiação com a Matéria

A atenuação da radiação ao interagir com a matéria não é um processo simples. Geralmente, a interação de um fóton primário de raios-X com a matéria não resulta no seu simples desaparecimento, mas sim em múltiplos eventos. A atenuação total é, portanto, a soma das atenuações resultantes de diferentes tipos de interações. As principais incluem o efeito fotoelétrico, a dispersão e a produção de pares.

Um feixe de raios-X ou raios gama, ao atravessar uma espessura homogênea de matéria, sofre atenuação exponencial. Isso significa que, à medida que a espessura do material aumenta, a intensidade transmitida do feixe diminui progressivamente. Dada uma intensidade incidente específica, a intensidade emergente é reduzida de acordo com uma lei exponencial em função da espessura do absorvedor, ou seja,

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (8)$$

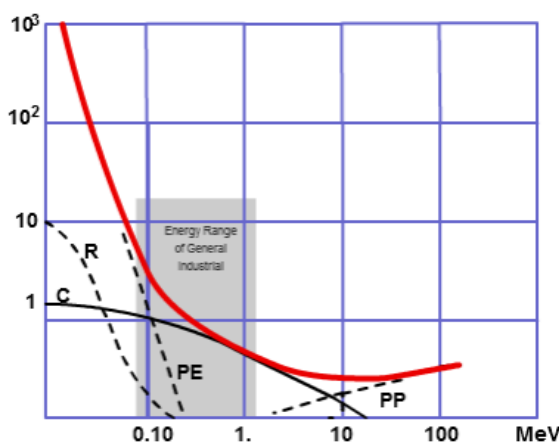
onde, I_0 é a intensidade incidente, I é a intensidade que atravessou a amostra através da espessura x e μ é uma constante que varia de maneira complexa tanto com a energia dos raios-X quanto com a natureza de absorção. A rigor, essa equação é verdadeira apenas para o caso de condições geométricas de feixe fino e um feixe de radiação monoenergético (Halmshaw, 1995).

Ao expressar a atenuação dos raios-X, μ é definido como o coeficiente de atenuação linear. Derivado deste, o coeficiente de atenuação de massa é calculado como μ/p , onde p representa a densidade física do material absorvente. O termo "seção transversal" é empregado para descrever a probabilidade de um fóton ser afetado por um processo específico de absorção ou espalhamento ao atravessar uma placa de material. Essa probabilidade é expressa em unidades de área, sendo o barn ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{cm}^2$) uma unidade comum. A seção transversal atômica, por sua vez, equivale ao coeficiente de atenuação (ou absorção) atômica.

O gráfico abaixo ilustra uma aproximação do coeficiente de absorção total (μ), em vermelho, para o ferro em função da energia da radiação. Em preto, são mostradas as quatro interações radiação-matéria que contribuem para a absorção total: fotoelétrico (PE), espalhamento de Compton (C), produção de pares (PP) e dispersão de Thomson ou Rayleigh (R). Como a maioria da radiografia industrial é realizada na

faixa de 0,1 a 1,5 MeV, o gráfico demonstra que o efeito fotoelétrico e o espalhamento de Compton são os principais responsáveis pela atenuação observada.

Gráfico 3-1- Aproximação do coeficiente de absorção total (μ), em vermelho, para o ferro em função da energia da radiação e em preto estão as quatro interações radiação-matéria.



Fonte: Iowa State University (s.d.)

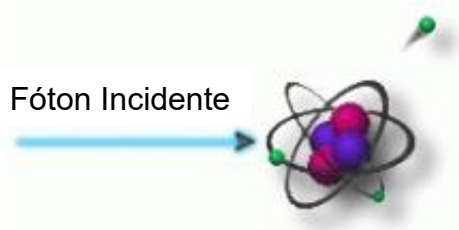
3.1.2 Mecanismos que Causam Atenuação de um Feixe de Raios-X

As características de atenuação e absorção de um material são diretamente influenciadas pela energia dos raios-X: elas aumentam ou diminuem conforme a energia é elevada ou reduzida. Pode haver conversão para energia de raios-X de um comprimento de onda diferente e uma direção de viagem diferente, ou pode haver liberação de partículas atômicas secundárias (Halmshaw, 1995).

Compreender a relação entre a espessura do material, suas propriedades de absorção e a energia do fóton é fundamental para obter uma radiografia de qualidade, já que as características de atenuação são cruciais para o contraste da imagem. Uma radiografia com maior contraste aumenta significativamente a probabilidade de detectar uma descontinuidade (Iowa State University, s.d.).

Na absorção fotoelétrica, um fóton interage com um átomo, sendo completamente absorvido e, conseqüentemente, desaparecendo. Como resultado dessa interação, um elétron atômico é ejetado do átomo. A energia do fóton é utilizada tanto para superar a energia de ligação do elétron à sua camada quanto para conceder-lhe energia cinética.

Figura 3-4- Absorção Fotoelétrica.



Fonte: Iowa State University (s.d.)

A energia de ligação dos elétrons aumenta à medida que se aproximam do núcleo e conforme o número atômico do elemento cresce; por exemplo, no chumbo, a energia de ligação para elétrons da camada K é de 88,6 keV. Para energias primárias de fótons superiores à borda K, os elétrons das camadas K e L são os principais responsáveis pela absorção via efeito fotoelétrico. Fótons com energia significativamente inferior à necessária para ejetar um elétron têm uma baixa probabilidade de serem absorvidos. Consequentemente, o coeficiente de absorção para o efeito fotoelétrico diminui rapidamente à medida que a energia do fóton incidente aumenta.

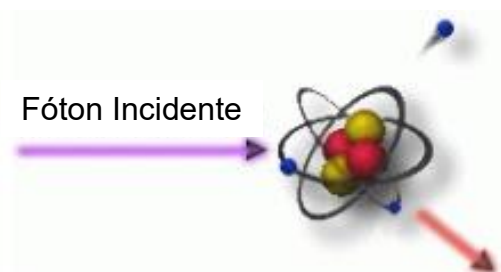
O efeito fotoelétrico exerce uma influência quase desprezível na atenuação para materiais de baixo número atômico e fótons com energias superiores a 100 keV. No entanto, sua relevância permanece apreciável em materiais de alto número atômico, mesmo na faixa de energia de megavoltagem. Em termos de direção, o elétron ejetado se desloca aproximadamente lateralmente ao feixe de fótons para energias primárias inferiores a 0,5 MeV. Contudo, devido ao maior momento dos fótons de alta energia, a direção predominante de ejeção do elétron torna-se mais frontal.

O átomo que perde um elétron por meio do efeito fotoelétrico é considerado ionizado. O fotoelétron ejetado perde energia ao gerar uma série de pares de íons enquanto se move pelo material. As camadas eletrônicas que perdem elétrons devido ao efeito fotoelétrico são preenchidas por elétrons de outras camadas. A diferença de nível de energia entre essas camadas resulta na emissão de radiação fluorescente, ou característica, pelo átomo. É importante notar que essa radiação secundária possui energia comparativamente baixa.

O Espalhamento Compton (C) descreve o processo de atenuação da radiação no qual um fóton de raio-X incidente interage com um elétron, resultando no desvio

do fóton e na ejeção do elétron, que adquire energia cinética. O fóton espalhado, agora com energia reduzida, prossegue sua trajetória através do material, implicando um aumento em seu comprimento de onda.

Figura 3-5- Espalhamento Compton



Fonte: Iowa State University (s.d.)

Também conhecido como espalhamento incoerente, este evento caracteriza-se por uma mudança de energia que varia em função do ângulo de espalhamento, sendo, todavia, independente das características do meio em que ocorre.

Em 1923, Arthur Compton observou pela primeira vez o Efeito Compton, uma descoberta que lhe valeu o Prêmio Nobel de Física em 1927. Esse achado é fundamental porque ele provou que a luz não pode ser compreendida unicamente como um fenômeno ondulatório. O trabalho de Compton foi decisivo para que a comunidade científica aceitasse o conceito de que a luz também se manifesta como um fluxo de partículas, os fótons, e que a energia dessas partículas é proporcional à sua frequência (Iowa State University, s.d.).

Embora um único evento de espalhamento Compton possa ser calculado com precisão, na prática da radiografia, onde os fótons atravessam uma espessura considerável de material absorvente, ocorre o espalhamento Compton múltiplo. Este último cenário apresenta uma complexidade computacional significativamente maior.

Para um único processo de espalhamento, a relação Compton é dada por

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{h}{mc}(1 + \cos\theta) \quad (9)$$

ou

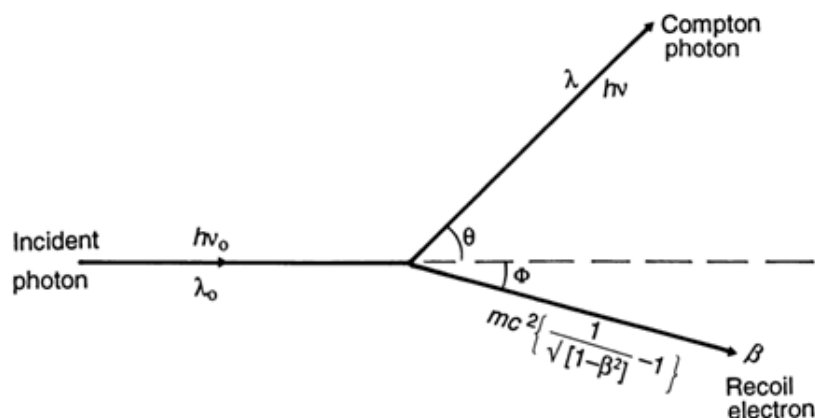
$$\alpha = \alpha_0/[1 + \alpha(1 - \cos\theta)] \quad (10)$$

e

$$\cos\theta = 1 - \frac{2}{(1+\alpha_0)\tan^2\phi+1} \quad (11)$$

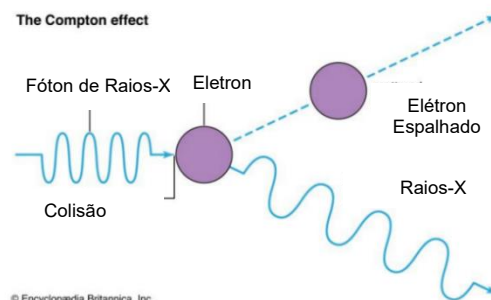
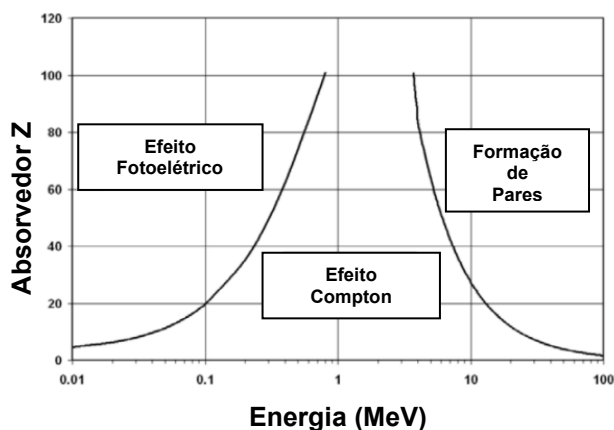
onde $\alpha_0 = h\nu_0 / mc^2$ é a energia do fóton incidente em mc^2 ($\lambda_0 = 1 / \alpha_0$), e $\alpha = h\nu / mc^2$ é a energia do fóton espalhado ($\lambda = 1 / \alpha$), ver Figura a seguir. O efeito Compton é, portanto, independentemente do número atômico do material de espalhamento (Halmshaw, 1995).

Figura 3-6- Espalhamento Compton conforme a equação acima.



Fonte: Halmshaw, 1995.

Figura 3-7- As interações predominantes dos raios-X com a matéria em função da energia dos raios-X. Especificamente com raios-X de alta energia na faixa de 1 MeV e 10 MeV, a interação predominante é o efeito Compton.

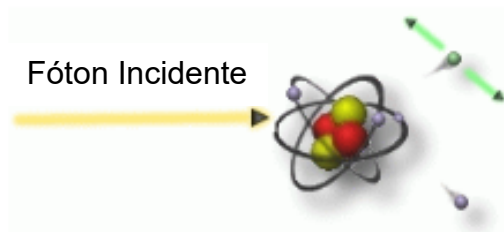


Fonte: Encyclopaedia Britannica, Inc.

O efeito de produção de pares ocorre apenas com fótons primários que possuem energia superior a 1,02 MeV, e sua probabilidade torna-se significativa apenas em energias consideravelmente mais elevadas. Nesse processo, um fóton individual é absorvido, resultando na criação de um par elétron-pósitron. Considerando que a massa de um elétron equivale a 0,51 MeV, qualquer energia que

exceda o limiar de 1,02 MeV é convertida em energia cinética para o elétron e o pósitron.

Figura 3-8- Produção de pares



Fonte: Iowa State University (s.d.)

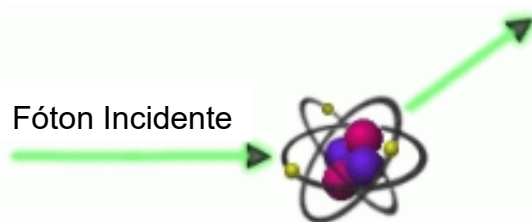
Os pósitrons possuem uma vida útil extremamente curta; sua aniquilação é acompanhada pela emissão de radiação, tipicamente na forma de dois fótons de 0,5 MeV, que se deslocam em direções opostas. O elétron gerado, por sua vez, pode produzir radiação de bremsstrahlung. Dessa forma, a atenuação por produção de pares resulta, predominantemente, em radiação espalhada com energia de 0,5 MeV. Em medições de radiação espalhada, emprega-se o termo "seção transversal diferencial". Este pode ser definido como a seção transversal por unidade de ângulo sólido para o espalhamento em um pequeno elemento de um ângulo sólido, em uma direção específica (Halmshaw, 1995).

A Iowa State University (s.d.) destaca que além dos mecanismos já mencionados, existem outros fenômenos de interação que podem ocorrer. Em circunstâncias especiais, eles podem precisar ser considerados, mas são, geralmente, insignificantes.

O Espalhamento de Thomson (R), também conhecido como Rayleigh ou espalhamento clássico, acontece quando um fóton de raio-X interage com o átomo como um todo.

Nesse processo, que é principalmente importante em energias de fótons baixas, o fóton incidente é espalhado pelos elétrons do átomo, sem produzir qualquer alteração na energia interna do átomo ou liberar nenhum elétron. O fóton é desviado, mas não muda em energia. Novamente, o espalhamento ocorre principalmente na direção direta e se torna mais próximo do alinhamento com o fóton primário à medida que a energia é aumentada. O efeito é mais importante para materiais de alto número atômico.

Figura 3-9- Espalhamento de Thomson.

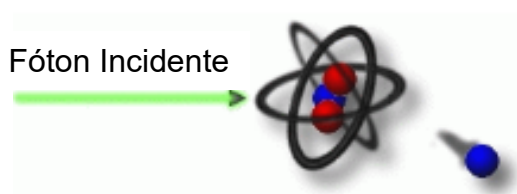


Fonte: Iowa State University (s.d.)

O espalhamento de Thomson contribui minimamente para o coeficiente de absorção e ocorre principalmente na direção frontal.

A Fotodesintegração (PD) ocorre quando um fóton de raio-X é capturado pelo núcleo do átomo, resultando na ejeção de uma partícula nuclear.

Figura 3-10- Fotodesintegração.



Fonte: Iowa State University (s.d.)

Isso acontece porque toda a energia do raio-X é transferida ao núcleo. No entanto, devido às energias extremamente altas necessárias para este processo, ele pode ser negligenciado nas energias de raios-X tipicamente usadas em radiografia.

3.1.3 Radiografia de alta energia

Ainda que diversos aspectos técnicos pertinentes à radiografia por raios-X de alta energia já tenha sido devidamente explorados, torna-se imperativo dedicar uma ênfase especial a pontos específicos. Certas características do desempenho dos equipamentos, como a dimensão do campo de irradiação, que possuem relevância secundária em aplicações com raios-X de baixa energia, adquirem uma importância significativamente elevada ao se empregar equipamentos de alta energia. Em contrapartida, outros fatores, como o tamanho do foco, demonstram uma redução em sua relevância. Adicionalmente à radiografia convencional baseada em filme, observa-se um interesse crescente no emprego de técnicas de fluoroscopia televisiva que

fazem uso de radiação de alta energia, expandindo o escopo das aplicações diagnósticas e de pesquisa (Halmshaw, 1995).

Qualitativamente, o aumento da energia dos raios-X acima de aproximadamente 1 MeV acarreta as seguintes consequências:

1. Aumento da probabilidade de espalhamento frontal: Há uma elevação na probabilidade de que a radiação espalhada se direcione predominantemente para a frente, ou seja, em um ângulo menor em relação ao feixe primário.
2. Redução da proporção de radiação espalhada em relação à direta: Diminui a proporção de radiação espalhada que alcança o filme, em comparação com a radiação direta, ao atravessar uma determinada espessura de material.
3. Aumento da penetração em materiais: Observa-se um incremento na quantidade de radiação capaz de penetrar uma dada espessura de material.

Para raios-X com energias inferiores a 10 MeV, a absorção de Compton configura-se como o processo de interação predominante, especialmente em materiais como o aço. Embora em energias mais elevadas a produção de pares ganhe relativa importância, sua relevância para as faixas de energia tipicamente empregadas em radiografia têm sido, até o momento, secundária em comparação com a absorção de Compton.

A atratividade da radiografia com raios-X de alta energia reside na combinação dos efeitos anteriormente mencionados (maior probabilidade de espalhamento frontal, redução da proporção de radiação espalhada e aumento da penetração). Essa sinergia possibilita a penetração em grandes espessuras de material e a obtenção de valores úteis de sensibilidade a defeitos, expandindo significativamente as capacidades de inspeção e diagnóstico.

A sensibilidade de espessura em radiografia é determinada por uma equação que inclui a razão $1+(I_s/I_D)/\mu$. Este termo, frequentemente denominado "fator de contraste de radiação", reflete diretamente a influência da energia da radiação. Uma redução no valor desta razão implica uma melhoria na sensibilidade de espessura, o que é altamente desejável. É importante notar que a sensibilidade a detalhes, seja avaliada por Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI) ou pela detecção de defeitos como trincas, também é influenciada por esse mesmo fator. Consequentemente, uma análise aprofundada da variação dessa razão em função de diferentes energias de raios-X e diversas espessuras de material é crucial. Tal estudo pode fornecer

informações valiosas para a seleção da energia de raios-X mais apropriada para uma vasta gama de aplicações e espessuras de componentes, otimizando a qualidade da inspeção radiográfica.

Halmshaw (1995) relata que devido à complexidade e natureza heterogênea dos feixes de raios-X, o cálculo preciso da razão I_s/I_D para condições radiográficas não é viável analiticamente, exigindo a utilização de dados experimentais. Os resultados obtidos a partir desses dados revelam uma conclusão notável: a sensibilidade de espessura, ou seja, o contraste radiográfico, exibe um comportamento distinto em relação à energia dos raios-X quando comparamos corpos de prova de aço de 70 mm ou mais espessos com amostras mais finas. Para uma amostra de aço de 25 mm, por exemplo, o aumento na energia dos raios-X resulta em um valor mais elevado de $[1+(I_s/I_D)]$, o que, por sua vez, leva a uma redução na sensibilidade de espessura. Esse é um efeito bem estabelecido na radiografia, onde o uso de energia de raios-X excessivamente alta pode comprometer a qualidade da imagem.

No entanto, para amostras muito espessas, nas quais a penetração exige o emprego de raios-X de megavoltagem, o efeito é inverso. Para uma amostra de aço de 100 mm, é possível alcançar uma melhor sensibilidade de espessura com raios-X de 10 MV do que com 1 MV. Isso ocorre porque, nesses casos, o termo $[1+(I_s/I_D)]$ diminui mais rapidamente do que a atenuação linear (μ), resultando em uma redução da razão à medida que a energia dos raios-X aumenta. Considerando que este é o principal impacto da energia dos raios-X na sensibilidade radiográfica, há uma justificativa substancial para empregar raios-X de energia muito alta na radiografia de espécimes espessos. Essa abordagem não apenas pode proporcionar sensibilidades aprimoradas, mas também contribuir para a redução dos tempos de exposição.

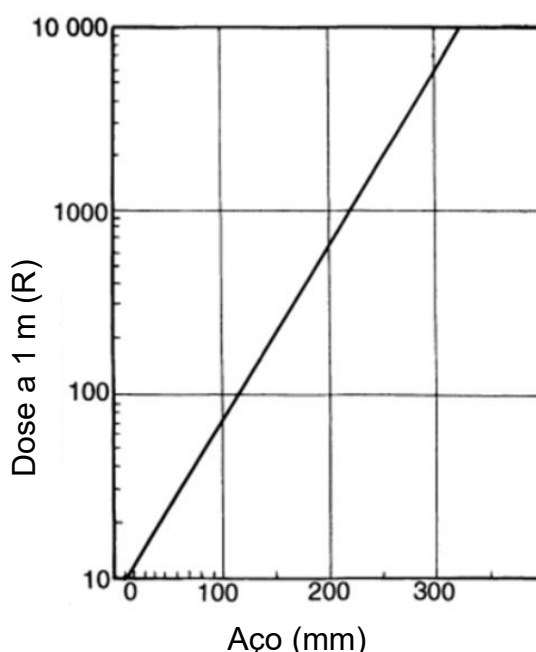
Entretanto, a questão da radiografia com raios-X de alta energia não se restringe apenas à sensibilidade de espessura. É crucial considerar a sensibilidade ao detalhe e a influência da energia dos raios-X na definição alcançável da imagem. Radiografias produzidas com radiação de alta energia tendem a apresentar uma menor nitidez de detalhes em comparação com aquelas geradas por energias mais baixas. Portanto, o aumento na falta de nitidez do filme deve ser um fator a ser cuidadosamente ponderado.

Os equipamentos de raios-X de megavoltagem mais amplamente utilizados são os aceleradores lineares (linacs), operando predominantemente na faixa de 4 a 8 MeV. Essa preferência é determinada por múltiplos fatores:

- **Custo:** Há um aumento significativo no custo de fabricação de máquinas com energias ainda maiores.
- **Adequação para Aplicações:** A capacidade de saída de um linac de 8 MeV é mais do que suficiente para atender à maioria das aplicações radiográficas.
- **Restrição do Campo:** À medida que a energia aumenta, o tamanho do campo de irradiação tende a se tornar mais restrito, o que pode limitar a área de inspeção.

Ao considerar raios-X de 8 MV gerados por um acelerador linear (linac), a saída típica da radiação situa-se na faixa de 2.000 a 6.000 R por minuto a uma distância de 1 metro. O tamanho do campo de irradiação pode atingir 1 metro de diâmetro a uma distância de 2 metros, enquanto o ponto focal apresenta um diâmetro de 2 mm. Para essa energia de radiação, a perda de nitidez inerente ao filme (nitidez do filme) é de 0,6 mm. Um gráfico de exposição específico para aço sob essas condições é apresentado abaixo.

Gráfico 3-2- Dados de exposição para raios-X de 8 MV: distância da fonte ao filme de 1 m; filme MX, densidade 2,0; telas intensificadoras de cobre, frente de 1,5 mm, verso de 0,25 mm.



Fonte: Halmshaw, 1995.

Tomemos como exemplo a radiografia de um espécime de aço com 250 mm de espessura, utilizando uma distância fonte-filme de 3 metros e filme MX. A nitidez geométrica resultante será de aproximadamente 0,17 mm, e o tempo de exposição estimado será inferior a 0,5 minutos. É importante ressaltar que, em linacs, a saída de raios-X é convencionalmente medida em unidades de radiação (R), e não em miliamperes. Além disso, a distância entre a fonte e o filme é geralmente determinada pela necessidade do tamanho de campo desejado, em vez de ser primariamente otimizada em função da nitidez geométrica (U_g).

Em alguns projetos de aceleradores lineares (linacs), há a capacidade de redirecionar o feixe de elétrons após a aceleração. Esse processo permite que os elétrons atinjam o alvo em um ângulo significativo em relação ao normal, o que, por sua vez, modifica a distribuição da intensidade dos raios-X no campo de irradiação. Por exemplo, em um linac de 5 MeV, essa técnica pode aumentar o tamanho do campo (medido como meio ângulo a meia intensidade) de 11° para 27°.

A elevada saída de radiação dos linacs modernos oferece vantagens significativas. Além de permitir o uso de grandes distâncias fonte-filme, o que contribui para uma melhor qualidade de imagem, essa característica torna viável a utilização de filmes de grão fino ou ultrafino em praticamente todas as aplicações. Isso é crucial para a obtenção de radiografias com maior resolução e detalhe.

No que diz respeito às telas de intensificação, materiais especializados são essenciais para otimizar os resultados. Embora as telas de intensificação de chumbo convencionais possam ser empregadas, a utilização de telas com materiais diferentes pode proporcionar sensibilidades superiores. A Tabela 3-1 detalha os materiais de tela e combinações mais eficazes para uso com diversas energias de radiação, auxiliando na escolha do arranjo ideal para cada aplicação.

Tabela 3-1- Telas de intensificação para uso com radiação X de megavoltagem.

| <i>Radiação do equipamento</i> | <i>Faixa de espessura útil, aço (mm)</i> | <i>Material de tela</i> | <i>Espessura da tela frontal (mm)</i> | <i>Espessura da tela traseira (mm)</i> |
|--------------------------------|--|-------------------------|---------------------------------------|--|
| Raios-X de 1-3 MV | 50-200 | Liderar | 1,0-1,6 | 1,0-1,6 |

| | | | | |
|--------------------------|--------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Raios-X de 3-8 MV | 70-300 | Cobre | 1,0-1,6 | 1,0-1,6 |
| Raios-X de 8-30 MV | 70-400 | Tântalo Tungstênio | 1,0-1,5 | Nenhum |
| Raios gama de cobalto-60 | 50-150 | Cobre Aço | 0,5-1,0 0,2-1,0 | 0,5-1,0 0,2-1,0 |

A degradação da imagem em radiografias de alta energia é predominantemente atribuída à tela de intensificação posterior. Ao utilizar telas mais espessas, que são recomendadas para raios-X de 3 MV e energias superiores, é crucial garantir um contato uniforme e eficaz entre a tela e o filme. A ausência de um bom contato pode comprometer significativamente a qualidade da imagem final. Para raios-X na faixa de 8 a 30 MV, os melhores resultados são geralmente obtidos sem o uso de tela de intensificação posterior. No entanto, se houver uma probabilidade considerável de radiação retro espalhada ser gerada na parte traseira do cassete de filme, a inclusão de uma tela posterior pode ser necessária para absorver essa radiação e mitigar seus efeitos adversos na imagem.

Já o propósito principal da tela frontal, quando se emprega radiação de alta energia, não é a intensificação. Sua função primária é absorver a radiação mais suave que é gerada dentro da amostra, contribuindo para a redução do ruído e a melhoria do contraste da radiografia.

Ao empregar raios gama de Cobalto-60, a utilização de telas de cobre ou aço pode proporcionar uma melhora considerável na sensibilidade de detalhes em comparação com as telas de chumbo convencionais. No entanto, é importante notar que essa otimização exige um dobro no tempo de exposição para compensar a menor intensificação desses materiais.

Em resumo, a relação entre tempo de exposição, sensibilidade e tamanho do campo em radiografias de aço utilizando radiação de megavoltagem:

1. Aço de 100 mm: Raios-X de 2 MV permitem radiografias com tempos de exposição razoáveis e sem restrições significativas no tamanho do filme. A

sensibilidade alcançável pode ser similar ou levemente superior à de energias mais altas.

2. Aço de 200 mm: Para manter tempos de exposição curtos, são necessários raios-X de 5 MV ou energias superiores. Para grandes tamanhos de campo, linacs mais potentes são vantajosos; para campos menores, betatrons oferecem tempos de exposição igualmente curtos.
3. Aço de 300 mm: Apenas linacs de alta potência possibilitam tempos de exposição curtos ao usar filmes de grão fino.
4. Aço de 100-300 mm: As diferenças na sensibilidade alcançável entre raios-X de 5, 8, 20 e 30 MV são relativamente pequenas.
5. Aço de 25-70 mm: Raios-X de 1 MV proporcionam sensibilidades consideravelmente melhores do que os raios-X de alta energia.

A característica distintiva dos betatrons, que geralmente possuem um ponto focal com largura inferior a 1 mm, permite a aplicação bem-sucedida da ampliação projetiva. Esse recurso é frequentemente citado como uma das principais vantagens dos betatrons em comparação com os aceleradores lineares (linacs).

Ampliações projetivas de 2:1 e até 3:1 têm sido empregadas, resultando em melhorias significativas na sensibilidade. Notavelmente, essas melhorias são evidentes na detecção de trincas muito estreitas que se alinham com o feixe de raios-X, otimizando a capacidade de inspeção e identificação de descontinuidades críticas.

3.2 Fontes de Radiação de Alta Energia

3.2.1 Tipos de Equipamentos de raio-X de Alta Energia

Unidades de transformador sintonizado (transformadores de ressonância)

Desenvolvido por Charlton e Westendorp, principalmente para geradores de 1 MV e 2 MV, esse equipamento utiliza um transformador de núcleo de ar. Diferente dos transformadores convencionais com núcleo de ferro, este é aterrado em uma das extremidades e imerso em um tanque com gás pressurizado, como Freon-12 ou hexafluoreto de enxofre, para isolamento.

Para garantir uma transferência de energia eficiente, os enrolamentos primário e secundário do transformador são ajustados (sintonizados) para a mesma frequência da alimentação elétrica. O espaço que normalmente seria ocupado por um núcleo de ferro é utilizado para acomodar um tubo de raios-X seccionado.

Apesar de problemas de fabricação de tubos de raios-X terem limitado a disponibilidade dessas máquinas em anos mais recentes, as unidades construídas na década de 1940 se destacaram pela confiabilidade excepcional. Algumas delas operaram por impressionantes 30 a 35 anos, demonstrando a durabilidade e a eficácia dessa tecnologia.

Gerador Van de Graaff

Os geradores Van de Graaff que foram utilizados na radiografia industrial, com a primeira construção datando de 1943. Esses equipamentos eram capazes de operar em tensões de 1, 2 e 3 MV. Embora vários conjuntos tenham funcionado até o início da década de 1990, eles não estão mais disponíveis comercialmente.

O funcionamento de um gerador Van de Graaff baseia-se na acumulação de cargas elétricas em um hemisfério de alta tensão (HT). O processo começa com uma tensão DC de cerca de 30 kV, gerada por um pequeno transformador e capacitor. Essa tensão é usada para "pulverizar" cargas elétricas por meio de uma descarga de corona de um pente sobre uma correia móvel de material isolante.

A correia, então, transporta essa carga até o interior do hemisfério HT, onde outro pente a "entrega" ao hemisfério. A tensão no hemisfério aumenta até que o isolamento seja rompido ou a descarga corona impeça o acúmulo de mais carga. Contudo, quando o gerador é conectado a um tubo de raios-X, uma carga constante é imposta, e uma condição de equilíbrio é atingida. A voltagem resultante corresponde a uma corrente no tubo de raios-X que é igual à taxa de fornecimento de carga pela correia.

Para atingir correntes de tubo elevadas, é necessário que a correia se mova em altas velocidades, da ordem de 1500 metros por minuto. Uma das vantagens desses geradores é que eles fornecem um potencial constante verdadeiro, o que resulta em uma velocidade uniforme dos elétrons. Isso, por sua vez, permite a

obtenção de um ponto focal muito pequeno, de aproximadamente 0,1 mm, no alvo do tubo de raios-X, o que é crucial para uma boa qualidade de imagem em radiografia.

O Betatron

O Betatron é uma máquina que acelera elétrons usando um campo magnético alternado em um caminho circular. Essencialmente, é um acelerador de partículas projetado para gerar raios-X de alta energia.

Os elétrons são injetados em uma câmara de vácuo em forma de "rosquinha" (toroidal), que fica posicionada entre os polos de um poderoso eletroímã. Quando uma corrente alternada é aplicada às bobinas do ímã, o fluxo magnético começa a variar. Quando o fluxo magnético passa por zero, um pequeno "pulso" de elétrons é injetado.

Conforme o fluxo magnético aumenta, ele faz duas coisas simultaneamente:

1. Acelera os elétrons: A mudança no fluxo magnético induz um campo elétrico que acelera os elétrons.
2. Guia os elétrons: O campo magnético os dobra em um caminho circular, mantendo-os em órbita.

Para que os elétrons mantenham uma órbita constante, a aceleração e o guiamento precisam estar perfeitamente equilibrados. A aceleração continua enquanto o fluxo magnético aumenta, ou seja, até atingir o pico da onda. Nesse ponto, os elétrons são direcionados para fora da órbita por um pulso DC, atingindo um alvo e produzindo raios-X. Os elétrons podem dar milhares de voltas na câmara antes de atingir o alvo, exigindo um vácuo extremamente rigoroso.

Aceleradores lineares (linacs)

Os aceleradores lineares de elétrons, mais conhecidos como linacs, representam um método avançado para produzir feixes de elétrons de alta intensidade, com energias que variam de 1 MeV para cima. Eles se tornaram a escolha predominante para radiografia industrial de alta energia, superando os betatrons, principalmente devido à sua capacidade de gerar feixes de raios-X com intensidade significativamente maior. A maioria dos linacs industriais opera na faixa de 5 a 12 MeV, embora existam modelos de 1-2 MeV e até 25 MeV.

O funcionamento de um linac de onda progressiva baseia-se no conceito de os elétrons "surfarem" em uma onda eletromagnética de alta frequência. Essa onda viaja em linha reta por um tubo acelerador especial, chamado guia de onda corrugado. O design desse guia é crucial: ele garante que a velocidade dos elétrons seja igual à velocidade de fase das micro-ondas. Dessa forma, os elétrons permanecem na mesma fase da onda de alta frequência e recebem energia continuamente do campo de micro-ondas, sendo acelerados.

A primeira parte do guia de onda, conhecida como seção "buncher", tem a função de agrupar os elétrons em pulsos curtos. Isso otimiza a interação com a onda eletromagnética, garantindo que os elétrons recebam a máxima energia. A maioria dos linacs modernos usa micro-ondas de 10 cm (banda S). Um linac de 5 MeV, por exemplo, tem um guia de onda corrugado de cerca de 1 metro de comprimento. Alguns modelos utilizam micro-ondas de 3 cm (banda X).

Os pulsos de alta frequência são gerados por um magnetron ou klystron, que é acoplado ao guia de onda. Os elétrons são injetados em uma extremidade do guia e, após serem acelerados, atingem um alvo na outra extremidade, produzindo raios-X. Na parte final do guia de onda, é possível reforçar o feixe de elétrons para obter um ponto focal menor e para aumentar a largura do campo de raios-X, o que é importante para diversas aplicações.

Distribuição de intensidade angular de raios-X

A distribuição da intensidade angular dos raios-X é um fator crucial na radiografia, especialmente com altas energias. Embora em energias abaixo de 1 MeV o tamanho do campo de raios-X não seja um problema, em energias mais elevadas, a intensidade do feixe se torna significativamente restrita a um ângulo menor.

Essa restrição angular tem um impacto direto no tamanho útil do campo de raios-X e na uniformidade da exposição. Para compensar um campo restrito, é necessário aumentar a distância entre a fonte e o filme, o que, por sua vez, leva a maiores tempos de exposição. As fórmulas propostas por Muirhead e Spicer [22] são amplamente aceitas para descrever essa distribuição, e os valores práticos de "meio-ângulo à meia-intensidade" (o ângulo no qual a intensidade do feixe cai para metade da intensidade central) demonstram essa característica. Por exemplo, a Tabela 3-2,

ilustra como o diâmetro do campo a 50% da intensidade do feixe central diminui com o aumento da energia.

Tabela 3-2- Tamanhos de campo em diferentes energias de raios-X, assumindo um feixe de elétrons paralelo

| <i>Energia de raios-X (MeV)</i> | <i>Meio ângulo fora do campo para intensidade de 50% (graus)</i> | <i>Diâmetro do campo para intensidade de 50% (cm)</i> |
|---------------------------------|--|---|
| 5 | 11 | 39 |
| 10 | 7 | 24.5 |
| 18 | 5 | 17.5 |
| 31 | 3.4 | 11.8 |
| 50 | 1.9 | 6.7 |

Com equipamentos que operam acima de 10 MeV, o estreitamento do campo de raios-X pode se tornar inconvenientemente pequeno para muitas aplicações. Para resolver isso, é comum inserir um compensador de campo próximo ao alvo do equipamento. Esse compensador é uma peça de metal que é mais espessa no centro do que nas bordas. Sua função é absorver mais do feixe central, que é mais intenso, e assim equalizar a intensidade ao longo de todo o feixe.

É importante notar que, embora o compensador aumente o diâmetro do campo de raios-X e melhore sua uniformidade, isso é alcançado à custa de uma redução na produção efetiva de raios-X, pois parte da energia do feixe é absorvida pelo compensador. A precisão na localização do compensador é fundamental para garantir a eficácia da equalização.

3.2.2 Fonte de radiação gama

A fonte de radiação gama empregada foi o isótopo Cobalto-60, apresentando uma dimensão focal de 4,2 x 4,6 mm e uma atividade de 49,0 Ci (Curie). A equivalência em termos de poder de penetração corresponde à radiografia obtida por um gerador de raios-X com energia de 3 MeV (Megaeletron-volts), embora a intensidade da fonte de Cobalto 60 seja comparativamente menor.

Esta fonte demonstrou capacidade de obter radiografias de qualidade (em função da técnica de exposição e do sistema detector de radiação empregados) em espessuras de até 200 mm de aço e aproximadamente 182 mm de cobre. Os parâmetros operacionais e as características detalhadas da fonte de radiação gama utilizada estão discriminados na Tabela 3-3.

Tabela 3-3- Dados característicos das fontes de Cobalto-60

| <i>ELEMENTO</i> | Cobalto |
|---|----------------------|
| Isótopo | 60 |
| Número Atômico - Z | 27 |
| Meia - Vida | 5,3 anos |
| Forma Química | Co |
| Raios Gama / Beta em MeV | 1,17 e 1,33 / 0,31 |
| Fator Gama (Γ) mC/kg.h/GBq a 1m / R/h.Ci a 1m ou mSv/h.GBq a 1m | 9,06 / 1,35 ou 0,351 |

Fonte: Master, 1959.

3.2.3 Aceleradores lineares

Os aceleradores lineares (LINACs) representam a convergência das mais recentes inovações obtidas ao longo de mais de quatro décadas de pesquisa fundamental, abrangendo áreas como física nuclear, física de plasma, propagação de micro-ondas e engenharia de alto vácuo (VARIAN, 1980; VARIAN, 2010).

A arquitetura básica de um acelerador linear é composta fundamentalmente, segundo Varian (1980, 2010) por três módulos principais, conforme ilustrado nas

Figuras 3.11 e 3.12: o console de controle (interface de operação), o cabeçote (gantry/estrutura de tratamento) e o modulador (sistema de geração de potência de radiofrequência).

Figura 3-11- Modelo de acelerador linear Linatron 400 e seus componentes



Fonte: Varian, 1980.

Figura 3-12- Modelo de acelerador linear Linatron M3 e seus componentes.



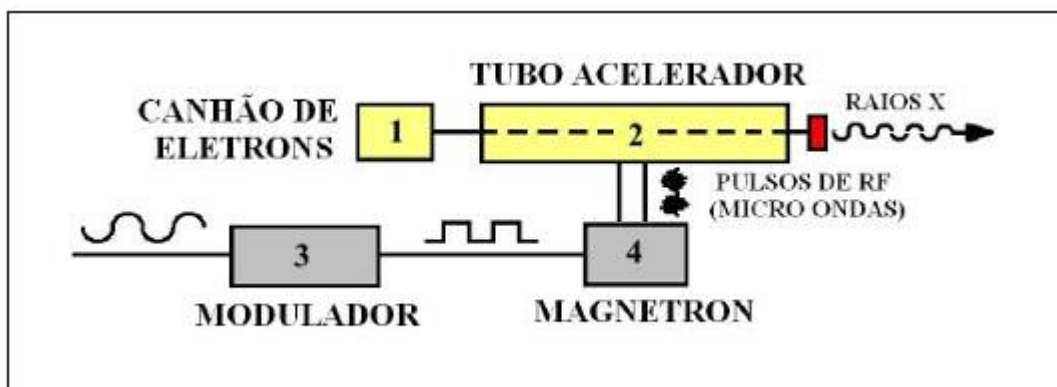
Fonte: Varian, 2010.

De acordo com Varian (1980), o canhão de elétrons (electron gun) injeta um feixe de elétrons em uma estrutura guia de onda, o tubo acelerador. Este tubo consiste em um cilindro metálico projetado especificamente com cavidades ressonantes de fabricação precisa. Concomitantemente, uma fonte de micro-ondas de alta potência (e.g., magnetron ou klystron) acopla energia eletromagnética de radiofrequência (RF)

ao tubo acelerador. Os elétrons, ao interagirem com o campo elétrico das micro-ondas, absorvem energia e são acelerados a velocidades relativamente próximas à velocidade da luz. O modulador é o subsistema responsável por fornecer pulsos de alta tensão, garantindo a sincronia da emissão do canhão eletrônico com a injeção de potência pela fonte de micro-ondas.

A configuração básica de um acelerador linear que utiliza um magnetron e um tubo acelerador colinear ao feixe de radiação é ilustrada na Figura 3.13.

Figura 3-13- Configuração básica do acelerador com Magnetron e tubo acelerador.



Fonte: Varian, 1980.

3.2.4 Características da fonte de raios-X de alta energia de Betatron

Visando especificar um sistema radiográfico para inspeção de estrutura de concreto de linha de transmissão em campo, buscou definir uma fonte de radiação que possibilitasse obter imagens radiográficas de alta resolução espacial e conseguisse atravessar até 1500 mm de concreto e operasse com dose relativamente baixa. Assim sendo, estudo de literaturas, contatos com fabricantes tanto de fonte de radiação como de detetor de Imaging Plate foram exaustivamente realizadas.

No passado, construiu-se torres de concreto armado para linhas de transmissão para tensão de 500 kV e ainda estão em operação. Atualmente, as torres de linhas de transmissão são essencialmente feitas de aço galvanizado e as consideradas as autoportantes, estão baseados em fundações de concreto armado.

Concreto armado para fundações das torres de aço autoportantes, são preparadas localmente em condições possíveis.

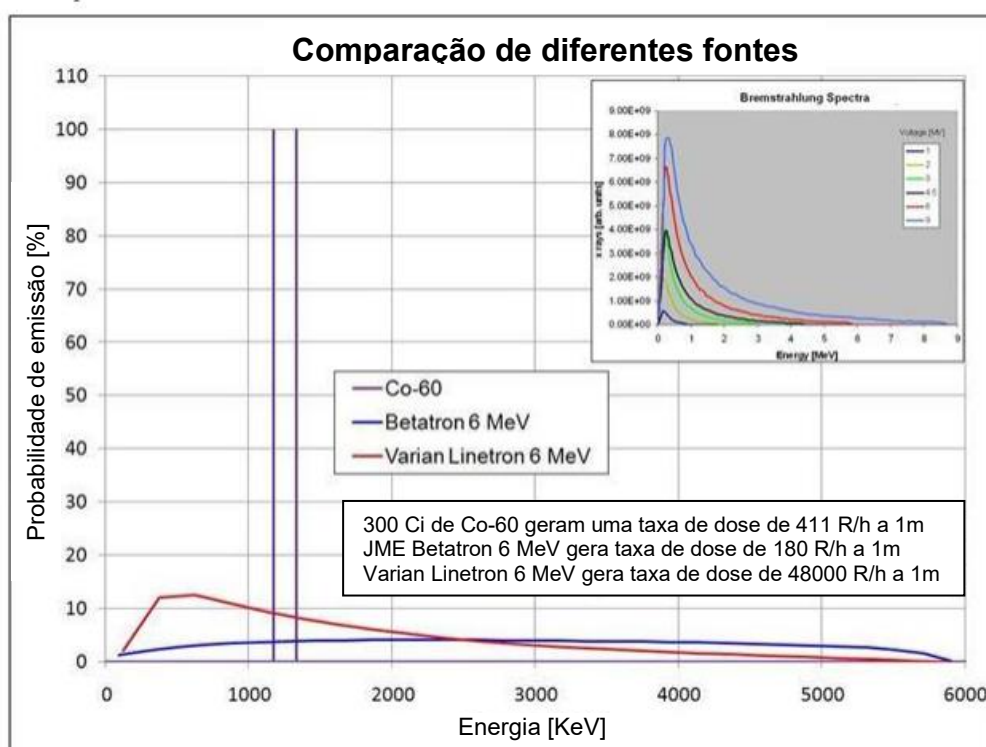
Em torres de concreto armado para linhas de transmissão de 500 kV, que são produzidos em locais adequado com controle rígido de qualidade, e são transportadas

posteriormente até o local de montagem em caminhões de grande porte. Entretanto, possui ferragens e cabos para dar rigidez a estrutura da torre de concreto armado que é montada localmente. E as ferragens de aço sofrem perdas de massa devido à corrosão, descargas naturais, descarga elétrica.

Assim sendo, para dar maior confiabilidade ao sistema de transmissão de energia elétrica, inspeção e monitoramento da integridade de suas partes que compõem as linhas de transmissão é de vital importância. Dentre as suas partes, a estrutura de concreto armado, ferragens no interior do armado.

As técnicas de inspeção não destrutiva da estrutura do concreto armado, assim como a integridade das ferragens no interior da estrutura de concreto armado. Comparação de diferentes fontes.

Gráfico 3-3- Comparação de diferentes fontes.



Fonte: Stoev (2014).

Tabela 3-4- Espessura das telas intensificadoras de chumbo usadas com raios gama e raios X de aceleradores lineares (8 MeV)

| Fonte | Espessura das telas frontais | Espessura das telas traseiras |
|---------------|------------------------------|-------------------------------|
| Raios gama | 0,10 para 0,25 mm | 0,12 para 1,20 mm |
| Linac (8 MeV) | 0,5 para 1,0 mm | 0,5 para 1,0 mm |

Fonte: IAEA, 2002

Para definir os parâmetros ótimos para obtenção de radiografia digital de qualidade de concreto armado utilizando uma fonte de radiação de energia chaveável de alta energia de 2 MeV a 7,5 MeV e foco pequeno (0,2mm x 1mm), que possibilita atravessar concreto com espessura de 500 mm e até 1500 mm de espessura e obter radiografia de alta qualidade, respectivamente, quando utilizado conjuntamente com sistema de detecção digital *Imaging Plate*, foram realizadas.

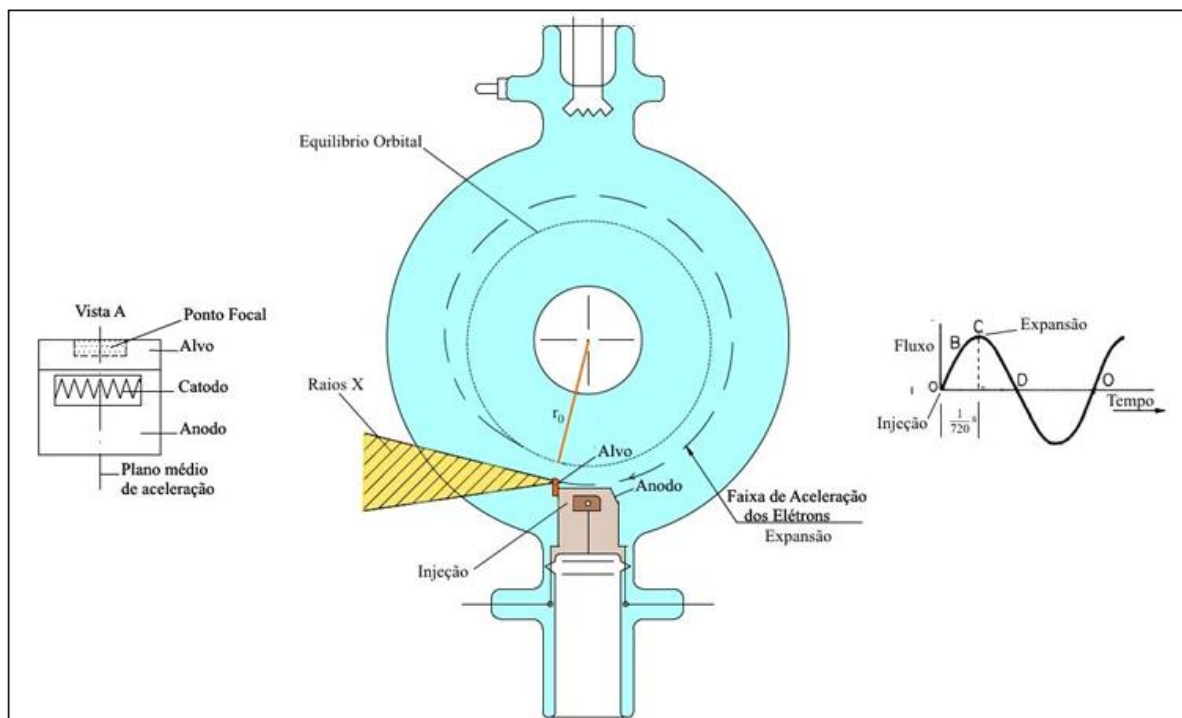
A tabela abaixo descreve as características do betatron, dados fundamentais para elaboração de procedimento experimental e plano de proteção radiológica no campo.

Tabela 3-5- Característica do betatron de 7,5 MeV.

| | |
|--|-------------------|
| Energia de Raios-X chaveável do betatron | 2 MeV a 7,5 MeV |
| Taxa de Dose a 1m (ar) (Feixe direto) | > 3R por minuto |
| Dimensão do Focal “spot size” (Max) | 0,3 x 3,0 mm |
| “Duty cycle” à 20° C (por hora) | 75% |
| Ângulo de saída do feixe de radiação | 26 graus |
| Tensão da Voltagem AC | 110/240V 50/60Hz |
| Dimensões [mm] e peso [kg]. | |
| Acelerador (Radiador) | 600x400x230;90kg |
| PSU – (Unidade de fornecimento de Energia) | 590x380x360;60kg |
| Painel de controle | 130x200x30; 0.5kg |

Fonte: JME Ltd.

Figura 3-14- Princípio de funcionamento de um Betatron.

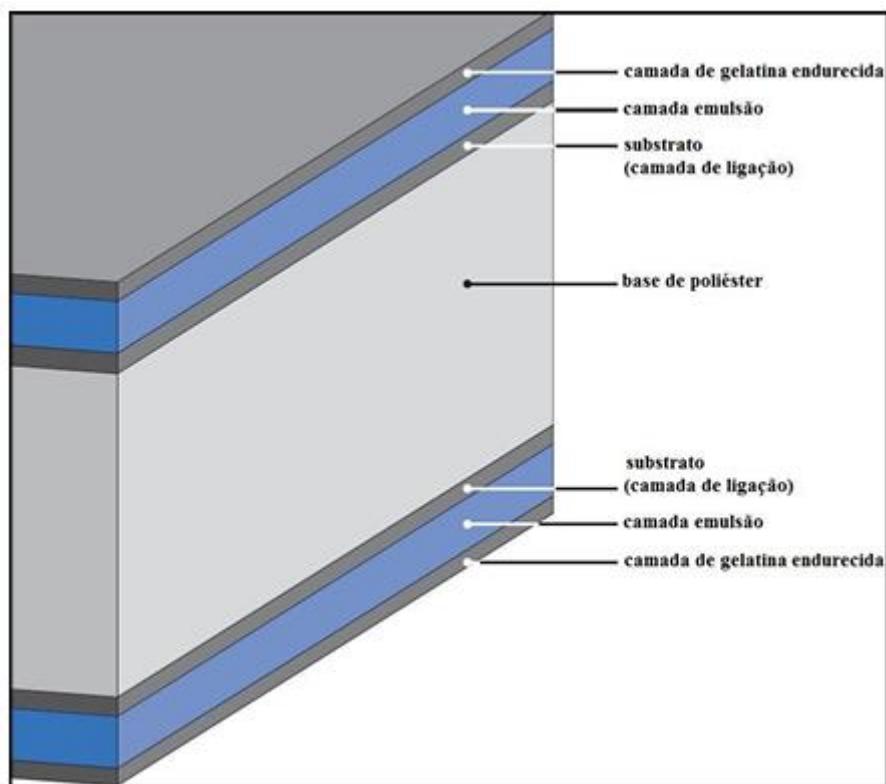


Fonte: JME, 2008.

3.3 Filmes radiográficos convencionais

A estrutura de um filme radiográfico é constituída por uma base de suporte polimérica transparente, tipicamente poliéster, que confere estabilidade mecânica, e uma emulsão fotossensível aplicada sobre esta base. A emulsão, com espessura da ordem de 0,025 mm, é composta por uma matriz de gelatina que incorpora uma alta concentração de micro cristais de haleto de prata, predominantemente brometo de prata. Uma distinção crucial em relação aos filmes fotográficos reside no fato de que os filmes radiográficos apresentam a emulsão depositada em ambas as faces da base (estrutura *double-sided*), conforme representado na Figura 3.15, visando a otimização da sensibilidade.

Figura 3-15- Camada dos filmes radiográficos.



Fonte: Raad, 2007

O princípio de formação da imagem baseia-se na propriedade dos cristais de haleto de prata de serem sensibilizados pela interação com a radiação ionizante ou fótons de luz (no caso de telas intensificadoras). Esta sensibilização estabelece a imagem latente. Durante o processamento químico, o agente revelador (reduzidor) atua seletivamente sobre os cristais sensibilizados, promovendo a reação de redução que converte o íon prata em prata metálica negra.

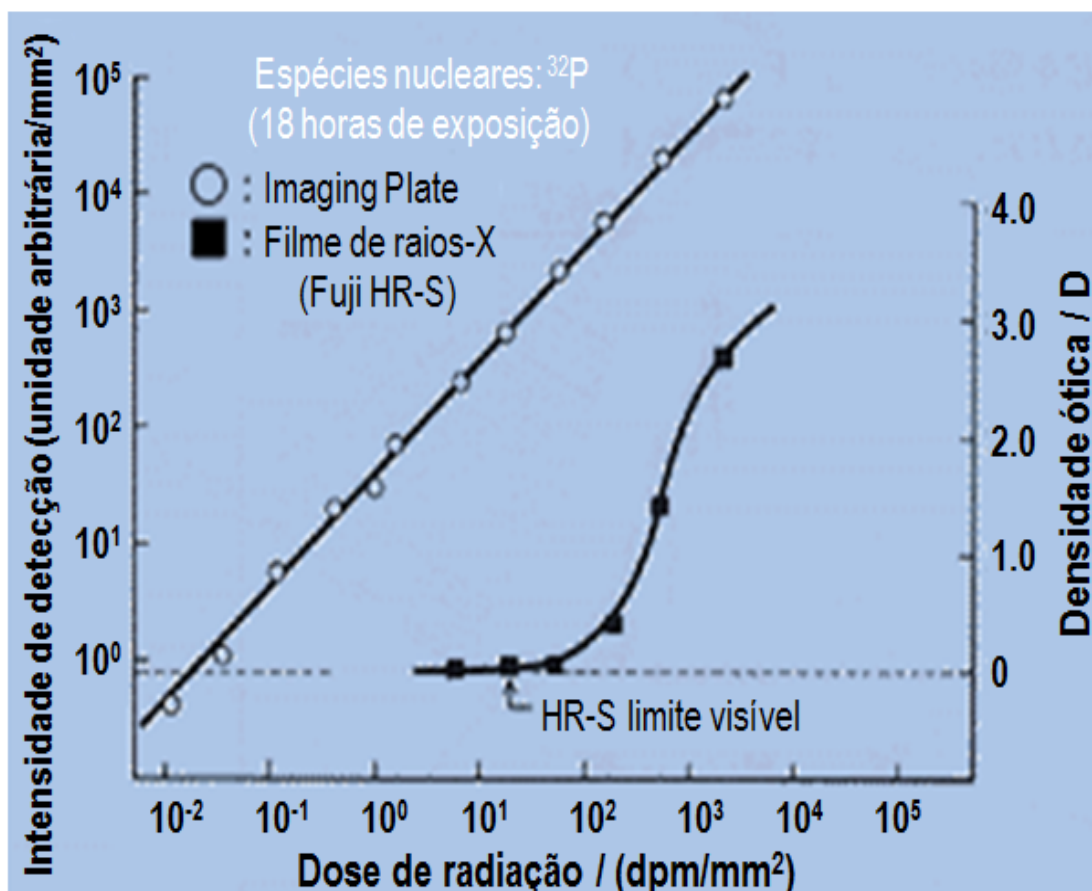
Consequentemente, as regiões do filme que receberam maior densidade de radiação exibem, após a revelação, uma maior concentração de grãos de prata metálica, resultando em maior densidade óptica (áreas mais escuras). Inversamente, as regiões de baixa exposição mantêm os cristais não sensibilizados. A variação na densidade de deposição da prata metálica negra gera os diferentes níveis de escurecimento (tons de cinza), que, ao serem visualizados em um negatoscópio, compõem a imagem radiográfica do objeto, conforme descrito por Pereira (2006).

3.4 Radiografia Computadorizada

3.4.1 Fundamentos do Detetor de Imagem Digital “Imaging Plate”

Na década de 1980, visando aplicação médica, a Fujifilm, no Japão, desenvolveu um detector inovativo bidimensional para uso em radiografia, denominado de *Imaging Plate* (IP), empregando o fenômeno de luminescência dos cristais (BaFBr:Eu^{2+}) (Amemiya e Miyahara, 1988; Rowlands, 2002; Chen, Lockwood, 2002; Leblans *et al.*, 2011; Fuji Photo Film, 2007; Ewert, 2002). O detetor IP possui mesclas das características dos detectores de pulso e integral. Em 1988, as características do IP foram detalhadamente investigadas e testadas como detector de raios-X nas técnicas de difração para estudos de estruturas cristalinas de materiais biológicas com sucesso, que apresentam naturalmente baixa intensidade de difração, espalhamento de raios-X com radiação síncrotron (Amemiya, Miyahara, 1988; Ewert, 2002; Veith, *et al.*, 2000) e foram observadas as seguintes características: altíssima sensibilidade, atingindo uma até três ordens de grandeza maior em comparação a um filme de raios-X convencional; faixa dinâmica extremamente maior; linearidade muito superior; excelente resolução espacial da ordem de 25 μm . Para a obtenção da imagem a partir do Imaging Plate utiliza-se um leitor a laser (*escâner*) dos dados digitais para o computador para posterior tratamento de imagens. Não há necessidade de uso de câmara escura e tampouco de produtos químicos tais como revelador, fixador como requer o filme de raios-X convencional. O Gráfico 3-4 mostra a excepcional sensibilidade e a linearidade do IP em relação ao filme de raios-X convencional, quando ambos foram submetidos a diferentes doses de radiação ionizante. A abscissa corresponde a doses de radiação emitidas por uma amostra padrão de ^{32}P (radiação beta de energia $E = 1,7 \text{ MeV}$).

Gráfico 3-4- Mostra a excepcional sensibilidade do Imaging Plate (IP) de duas a três ordens superiores que no filme de raios-X e a linearidade (faixa dinâmica) em comparação com o filme de raios-X.

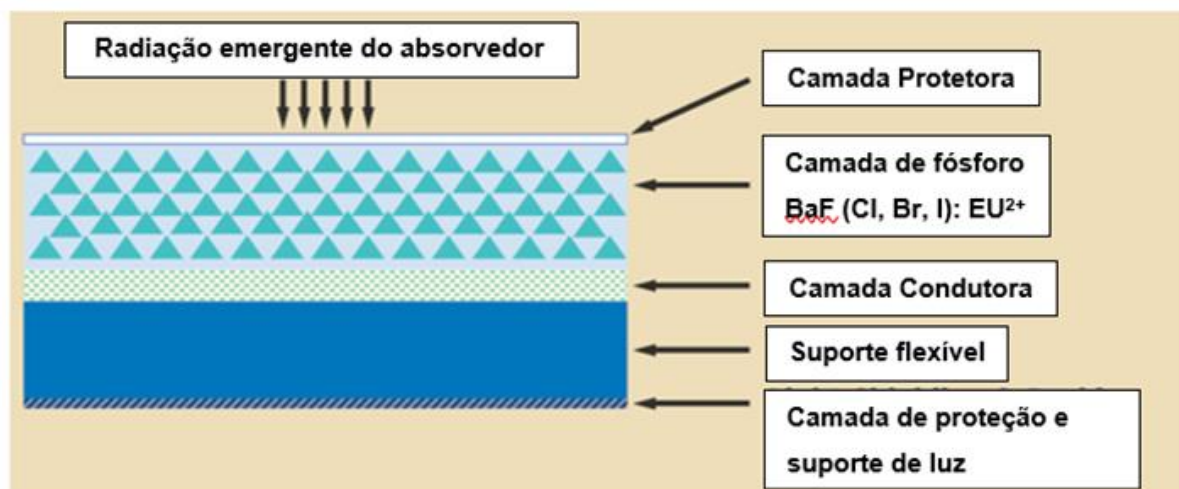


Fonte: Fuji Film.

O eixo da ordenada à esquerda representa a quantidade de radiação luminescente acumulada pelo IP e o eixo da ordenada à direita mostra a densidade óptica (grau de escurecimento de um filme de raios-X). Estas características são também similares para feixes de elétrons, raios-X, raios- γ e partículas beta de diferentes energias. Estas características do Imaging Plate abrem novas aplicações ainda não exploradas até o momento.

A Figura 3-15 ilustra a seção transversal de um IP.

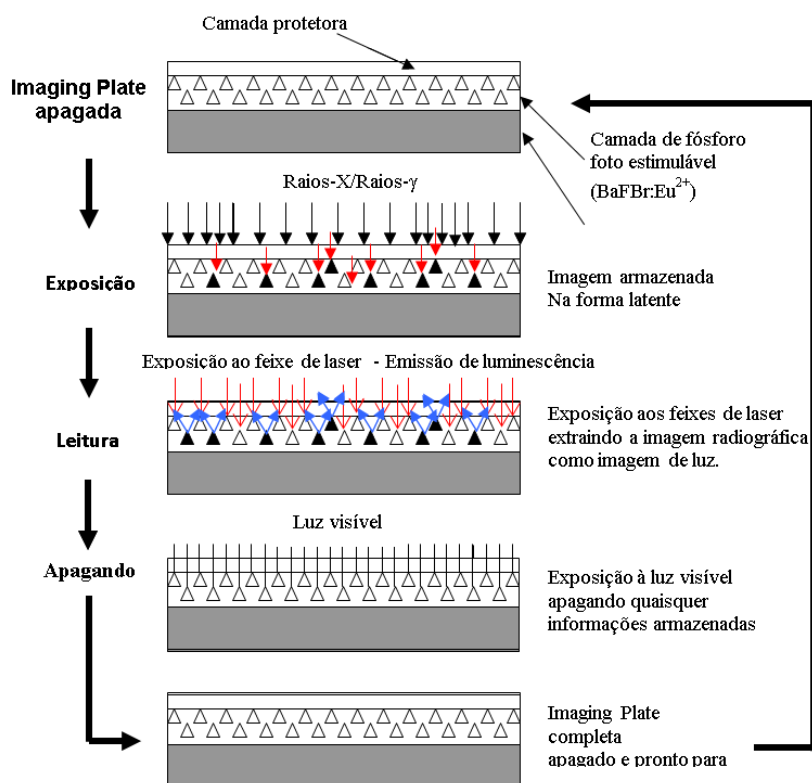
Figura 3-16- Seção transversal de uma placa típica de imagem de fósforo de armazenamento.



Fonte: ASTM E2007-10

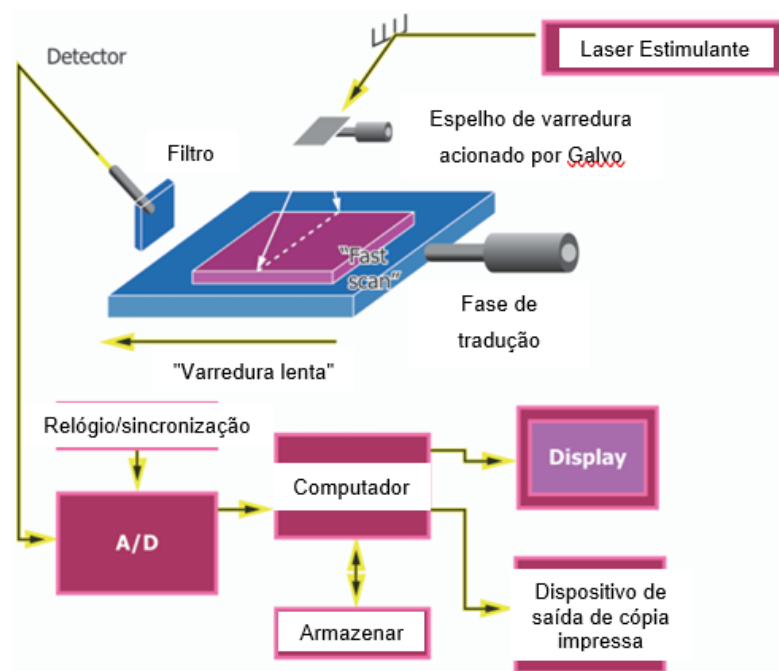
Na Figura 3-17 é apresentado um esquema simplificado sobre o funcionamento e processamento usualmente adotado na prática para realizar ensaios de radiografia com o detector IP. Procedimento detalhado pode ser encontrado, por exemplo, na norma da ASTM E2007-10 (reaprovado em 2023). Após a exposição, a imagem radiográfica fica armazenada na forma latente nos cristais de (BaFBr:Eu^{2+}) , mas, logo após a exposição à radiação ionizante, inicia-se um processo de perda de informações devido ao efeito conhecido por *fading*. A recuperação da imagem armazenada no IP é realizada pelo processo denominado de OSL – *Optical Stimulated Luminescence*, que é um efeito não-linear. Quando o feixe de laser de He-Ne, de 632 nm, é incidido sobre o IP, há emissão de luminescência com comprimento de 488 nm por efeito de OSL, a qual é capturada por um tubo fotomultiplicador (PMT) e logo é convertido para sinal digital passando por um conversor ADC, que converte sinal analógico para sinal digital. Assim, a imagem radiográfica latente no IP é recuperada, transferida e armazenada num computador para posterior processamento. Para reutilizar o IP, ele é exposto por alguns minutos num apagador que emite luz branca. Para aplicação industrial, o IP pode ser reutilizado em torno de 1.000 vezes, dependendo do manuseio do IP.

Figura 3-17- Procedimento simplificado de processamento do uso do Imaging Plate (IP): exposição, leitura, apagamento e reuso.



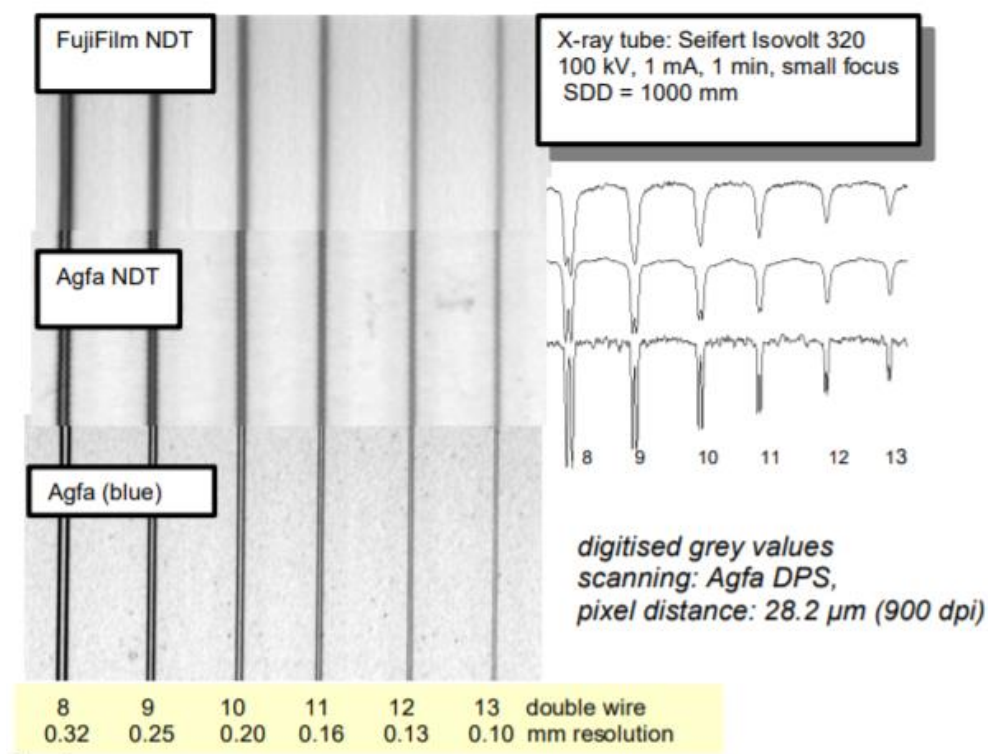
Fonte: Shinohara *et al.* (2002).

Figura 3-18- Processo fundamental de aquisição e exibição de imagens na Radiografia Computadorizada (CR).



Fonte: ASTM E2007-10

Figura 3-19- Avaliação total de penumbra.



Fonte: Ewert et.al., 2006.

Em termos de resolução espacial radiográfica do Imaging Plate, que está relacionada com a penumbra do filme, U_f , refere-se a capacidade de discernir detalhes. Atualmente, existem dois tipos de Imaging Plate disponível comercialmente, tipo “standard” (altíssima sensibilidade mas resolução espacial relativamente baixa) e tipo “azul” (sensibilidade alta, mas menor que o Imaging Plate “standard”, mas possui resolução espacial superior), (Ewert, 2002).

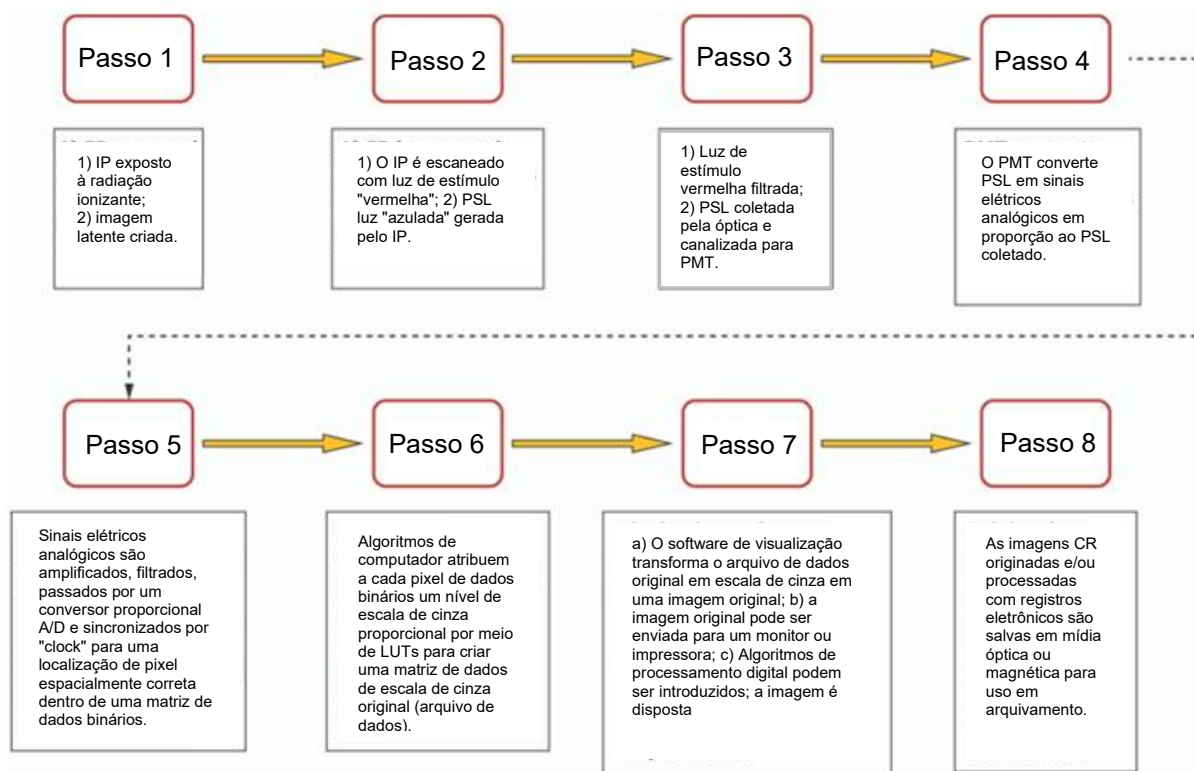
3.4.2 Radiografia Computadorizada (CR)

Fundamentos da Radiografia Computadorizada

A Radiografia Computadorizada (CR) é uma das modalidades da radiografia digital que utiliza placas de fósforo de luminescência fotoestimulável (PSL) reutilizáveis, mais conhecidas como IPs (Placas de Imagem), para capturar as imagens radiográficas.

A Figura 3-20 demonstra o processo básico de CR. Nela, uma configuração de exposição radiográfica convencional, como a especificada na Guia E94, é empregada: uma peça é posicionada entre a fonte de radiação e a IP para ser exposta.

Figura 3-20- Processo Básico de Radiografia Computadorizada



Fonte: ASTM E2007-10

O processo de Radiografia Computadorizada (CR) começa na etapa 1 com a exposição da Placa de Imagem (IP), criando uma imagem latente com luminescência retardada.

Na Etapa 2, o IP exposto é submetido a uma varredura indexada por um laser de luz vermelha. Durante essa varredura, o IP é estimulado a liberar a energia da imagem latente em forma de luz visível fotoestimulada (PSL) azulada.

Em seguida, na Etapa 3, essa luz PSL azulada é coletada por um sistema óptico que inclui um filtro cromático (para bloquear a luz vermelha do laser de estímulo) e é direcionada para um tubo fotomultiplicador (PMT).

Na Etapa 4, o PMT converte a luz PSL em sinais elétricos analógicos, cuja intensidade é proporcional à quantidade de PSL coletada.

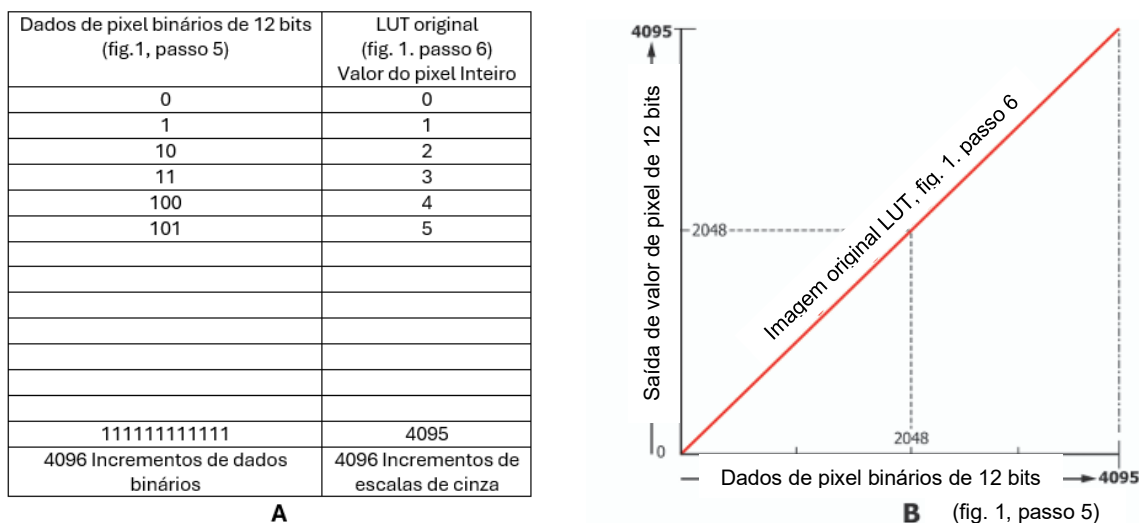
Na Etapa 5, esses sinais elétricos analógicos são amplificados, filtrados e convertidos em sinais digitais por um conversor analógico-digital (A/D). Esses dados

digitais são então sincronizados por um "relógio" para serem atribuídos à sua localização espacial correta em uma matriz de dados binários.

O tamanho do pixel binário em radiografia computadorizada é definido pela velocidade de varredura e pela taxa de amostragem do laser. A resolução da imagem, embora limitada pelo tamanho do pixel, é também influenciada por outros fatores como o tamanho dos cristais de fósforo, a espessura da camada de fósforo, o tamanho do ponto do laser e a óptica. Todos esses elementos contribuem para a qualidade da imagem digital. Esses "pixels" (derivado de "elementos de imagem") são as menores unidades controláveis da imagem digital binária, formando a base de todos os atributos técnicos da imagem final. Uma coleção organizada desses pixels, contendo dados binários e ainda sem níveis de cinza atribuídos, é chamada de matriz de dados de pixels binários.

Na Etapa 6 do processamento de imagens de Radiografia Computadorizada (CR), algoritmos computacionais transformam os dados binários dos pixels em uma imagem com níveis de escala de cinza. Isso é feito combinando os dados binários com "tabelas de consulta" (lookup tables), que atribuem um tom de cinza específico a cada pixel. Por exemplo, em uma imagem de 12 bits, que tem 4096 tons de cinza possíveis, o computador distribui esses tons igualmente entre o branco ("0") e o preto ("4095"). Assim, um número binário maior, indicando mais luz fotoestimulada, pode corresponder a um tom de cinza mais escuro. O resultado é uma matriz de dados em escala de cinza original, que pode ser salva em formatos padrão como DICOM, TIFF ou BITMAP. A Figura 3-21-A exemplifica uma tabela de consulta linear, mostrando a correspondência entre números binários e valores de pixel inteiros. A Figura 3-19-B ilustra graficamente como um algoritmo aplica isso para criar uma imagem tonal que se assemelha a um filme radiográfico. Geralmente, os algoritmos de CR atribuem os valores de escala de cinza de forma linear à magnitude de cada pixel binário. O número de valores de cinza selecionáveis é definido no software de visualização como "profundidade de bits".

Figura 3-21- (A) Tabela de consulta linear original de 12 bits / (B) Versão gráfica da LUT linear aplicada.



Fonte: ASTM E2007-10

A Etapa 7 do processo de Radiografia Computadorizada (CR) envolve a transformação da matriz de dados em escala de cinza em uma imagem original por meio de software de visualização. Essa imagem pode ser exibida em um monitor eletrônico ou impressa, com uma aparência tonal de cinza similar à de um filme radiográfico, onde valores de cinza crescentes resultam em menor luminosidade. A análise da imagem digital permite a caracterização de falhas de forma parecida com o filme, e ambas as modalidades exigem ambientes com pouca iluminação de fundo para visualização. No entanto, a imagem digital CR é uma modalidade distinta, demandando conhecimento em fundamentos de imagem digital. Após a visualização inicial, técnicas adicionais de processamento de imagem (Seção 8) podem ser aplicadas para aprimorar detalhes e finalizar a avaliação. Esse processo é denominado "radiografia computadorizada" devido à sua dependência de complexos processos computacionais para gerar uma imagem significativa.

Finalmente, na Etapa 8, as imagens digitais (originais e/ou processadas) e os registros eletrônicos são salvos em mídia óptica, magnética ou impressa para uso futuro. Impressões digitais de alta qualidade pode ser benéficas para algumas aplicações. A Figura 3-22 ilustra os componentes de hardware típicos de um sistema CR. A complexidade da tecnologia CR justifica as seções subsequentes da norma, que detalham o processo e fornecem referências adicionais (Seção 11).

Figura 3-22- Scanner CR típico, estação de trabalho e placa de imagem.



Fonte: ASTM E2007-10

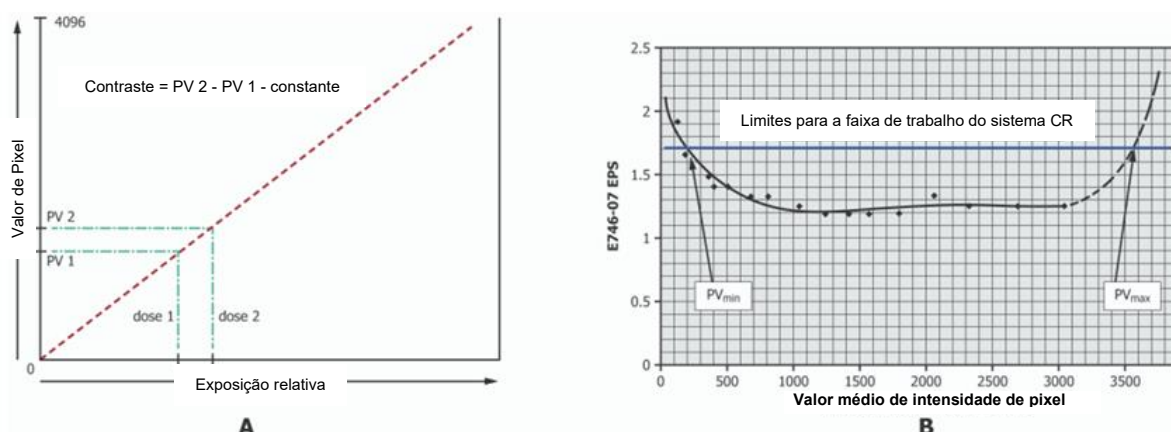
Técnicas básicas de Radiografia Computadorizada

Técnicas de RC bem-sucedidas geralmente dependem da técnica de exposição (Etapa 1, Figura 3-20) em conjunto com técnicas adequadas de processamento de imagem para atingir os objetivos de qualidade de imagem/faixa dinâmica necessários. Semelhante aos sistemas em filme, as técnicas de RC dependem do controle das propriedades de contraste, ruído e resolução da imagem.

A qualidade da imagem em CR, assim como no filme radiográfico, está diretamente ligada à exposição à radiação que a Placa de Imagem (IP) recebe. Medimos essa exposição de forma eficaz analisando o valor linear do pixel na área de interesse, semelhante à densidade óptica em filmes. Em imagens digitais "negativas", um pixel mais escuro indica maior radiação recebida.

Para otimizar o processo, é fundamental criar uma curva de exposição CR (dose de radiação vs. valor de pixel) para cada material, espessura e tipo de radiação. A Figura 3-23-A ilustra essa relação típica. O objetivo é alcançar uma exposição específica dentro de uma "janela" de tempo controlada, manipulando os quanta e a dose.

Figura 3-23- (A) Exposição vs. Valor de Pixel / (B) Qualidade de Imagem EPS vs. Valor de Pixel.



Fonte: ASTM E2007-10

Os dados de exposição em CR podem ser lineares ou logarítmicos em uma vasta gama de níveis, garantindo um contraste previsível. À medida que a exposição aumenta, a qualidade da imagem geralmente melhora, devido ao aumento da relação contraste-ruído (CNR) e da relação sinal-ruído (SNR), além da sensibilidade do penetrômetro equivalente (EPS) (Figura 3-23-B). No entanto, a SNR não cresce linearmente e atinge um máximo, a partir do qual doses adicionais não trazem melhoria.

Cada usuário deve qualificar uma faixa de valores de pixel que demonstre boa qualidade de imagem para sua aplicação. É importante notar que a maioria dos sistemas CR atinge um ponto de saturação de exposição na extremidade superior da faixa, onde a qualidade da imagem pode cair drasticamente. Um sistema é "saturado" quando os cristais de fósforo são superexpostos a ponto de não haver contraste significativo entre o defeito e o fundo. Por exemplo, em sistemas de 12 bits, a qualidade pode diminuir quando os valores de pixel excedem cerca de 3000.

Para ajustar o contraste (como na Figura 3-23-A), pode-se alterar a inclinação da curva, seja trocando o IP/sistema de scanner ou através de processamento de imagem.

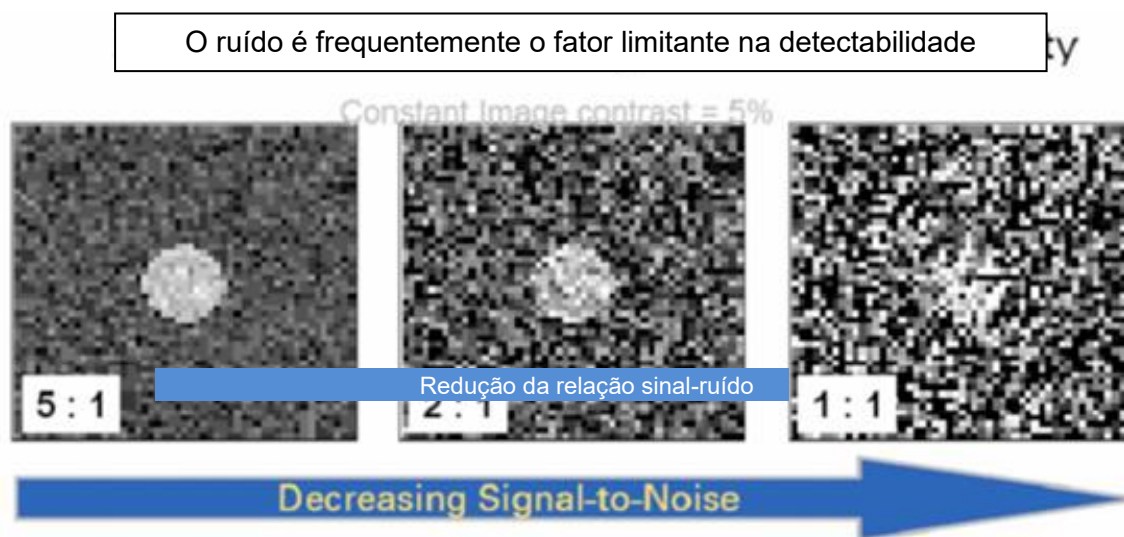
A Radiografia Computadorizada (CR) se destaca dos sistemas de filme único por sua ampla faixa dinâmica, ou seja, a capacidade de exibir diversos níveis de escala de cinza visíveis em uma vasta gama de espessuras de material, especialmente com o auxílio do processamento de imagem. Contudo, a qualidade da imagem em CR está diretamente atrelada a uma boa relação sinal-ruído (SNR). Para

que os resultados sejam eficazes, a Placa de Imagem (IP) deve receber quanta de exposição suficientes.

A faixa dinâmica é, portanto, definida como o intervalo de espessuras de material que produz uma qualidade de imagem aceitável (ou seja, uma faixa de contraste utilizável). De modo geral, quanto menos rigorosos forem os requisitos de qualidade da imagem, maior será a faixa dinâmica da CR em comparação com os sistemas de filme convencionais.

O ruído em imagens digitais de CR é um fator comum que compromete a qualidade. Ele surge de várias fontes complexas, resultando em uma variação aleatória e excessiva nos valores dos pixels. Essa variação está principalmente associada à distribuição aleatória dos fótons absorvidos dentro da Placa de Imagem (IP) do detector. Em termos práticos, esse ruído indesejado interfere na visibilidade de detalhes pequenos ou pouco nítidos, justamente por causa dessas variações estatísticas nos valores dos pixels. A Figura 3-24 ilustra claramente como o aumento do ruído impacta negativamente a qualidade final da imagem.

Figura 3-24- Efeitos do ruído na qualidade da imagem digital.



Fonte: ASTM E2007-10

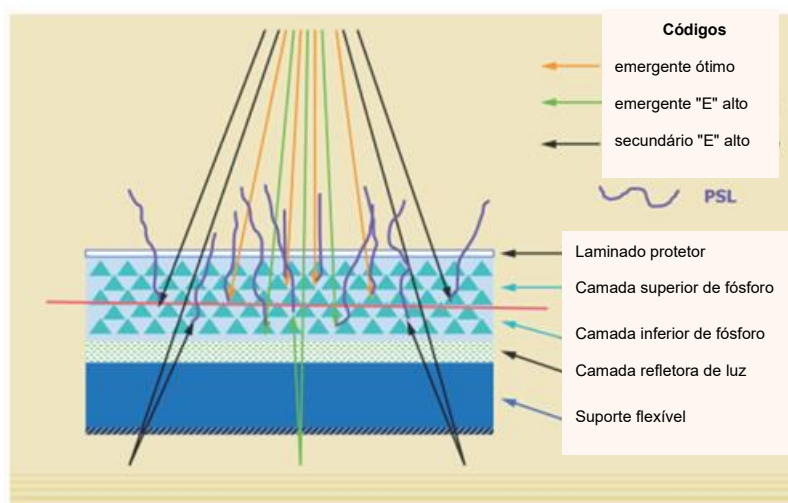
O ruído em imagens de CR geralmente tem sua origem em: 1) irregularidades no material de fósforo do detector IP (como tamanho ou espaçamento inconsistentes); 2) exposição insuficiente do IP a fótons de radiação, resultando em uma baixa relação sinal-ruído (SNR); 3) espalhamento da radiação primária dentro da peça testada; e 4) espalhamento da radiação secundária do ambiente. Detectores de CR que usam

materiais PSL são mais propensos a ruído, pois são mais sensíveis à radiação ionizante de baixa energia que o filme tradicional.

Para controlar ou minimizar o ruído, podemos: 1) usar detectores de fósforo com cristais finos, densos e uniformemente distribuídos; 2) otimizar a fonte de radiação e o arranjo de exposição para que mais fótons sejam absorvidos pelo detector; e 3) controlar rigorosamente a radiação secundária (com filtros, diafragmas e colimadores).

Embora todas essas causas sejam relevantes, a baixa quantidade de radiação absorvida combinada com um IP ou detector de CR "ruidoso" é frequentemente a principal fonte de problemas (como mostra a Figura 3-25). A quantidade de radiação absorvida no IP é influenciada pela composição e espessura do material, pelo nível de energia da radiação e pela intensidade da fonte. Controlar a dose de radiação, equilibrando os outros fatores de exposição, também é crucial para minimizar o ruído e maximizar a relação contraste-ruído (CNR).

Figura 3-25- Ilustração de ruído e nitidez no detector CR.



Fonte: ASTM E2007-10

A eficiência (ruído e resolução) de um detector de Placa de Imagem (IP) é crucial e depende da quantidade de luz fotoestimulável (PSL) que é direcionada corretamente para a ótica do sistema de CR. Quanto mais espessa a camada de fósforo do IP, maior a chance de um fóton PSL se dispersar e ser capturado fora da área do pixel correto, o que reduz a resolução e piora a qualidade da imagem (como ilustra a Figura 3-25). Esse problema é mais acentuado em IPs de fósforo do que em

filmes, devido ao material de suporte refletor que desvia a luz. Em suma, quanto maior o trajeto da luz PSL até a ótica, pior a resolução potencial.

Para aprimorar a eficiência de absorção, os projetos modernos de IP focam em aumentar a espessura ou a densidade da camada de fósforo. Geralmente, IPs com um material de fósforo mais denso e uma camada mais fina tendem a gerar melhor resolução e qualidade de imagem. No entanto, uma camada muito fina pode armazenar menos energia, resultando em um sinal mais fraco e um comprometimento entre ruído e resolução. Embora a ótica do CR também influencie a nitidez, o design do detector de IP é o fator limitante predominante.

Fabricantes de CR oferecem diferentes versões de IPs (e classes ASTM E2446), que equilibram velocidade ISO e resolução, similar às classes de filme. Os usuários devem selecionar IPs adequados e considerar sua classe ao desenvolver técnicas de exposição.

É possível minimizar distorções e ruídos do detector otimizando a eficiência de absorção da camada de imagem do IP. Isso geralmente ocorre quando os níveis de energia da radiação que emergem da peça são os mais baixos possíveis para a inspeção (atingindo o máximo de quanta), favorecendo a absorção na camada superior do fósforo (Figura 3-25). Energias mais altas tendem a penetrar mais fundo ou passar pelo detector, gerando radiação secundária indesejada que degrada a relação sinal-ruído. Além das técnicas de exposição controlada, a eficiência ideal do IP depende da escolha correta da placa de imagem e de materiais de filtragem (telas) otimizados para a faixa de energia da radiação utilizada.

Para obter uma qualidade de imagem otimizada em muitas técnicas de Radiografia Computadorizada (CR), é comum o uso de telas metálicas nos cassetes de exposição da Placa de Imagem (IP). A configuração típica é um arranjo tipo sanduíche: uma tela frontal é colocada entre a fonte de radiação e o IP, e uma tela traseira pode ser adicionada atrás do IP, ambas em contato direto com as superfícies do IP para máxima eficiência.

A escolha do tipo e espessura da tela metálica depende dos requisitos específicos da inspeção, dos níveis de energia da radiação e de outras considerações da aplicação. De modo geral, as telas são usadas para filtrar a radiação de exposição e controlar o espalhamento indesejado de radiação secundária, o que resulta em uma melhoria significativa na qualidade da imagem.

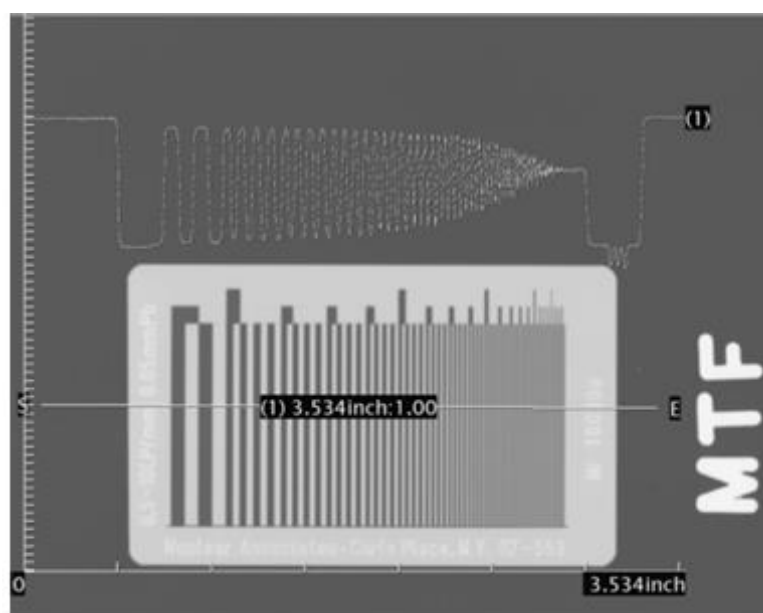
Resolução espacial e resolução espacial básica são termos que definem o nível de detalhe que uma imagem digital pode ter, onde maior resolução significa mais detalhes visíveis. Em imagens digitais, a resolução é comumente descrita pelo número de pixels-colunas (largura) e linhas de pixels (altura), ou pelo total de megapixels (colunas x linhas). Outra forma é a resolução por unidade de comprimento, como pixels por polegada (PPI) ou por mm. A resolução de uma imagem digital (medida por suas colunas e linhas) é determinada pela densidade de pixels em qualquer direção ou em ambas. O tamanho real de um pixel é definido pela quantidade de pixels nessas colunas e linhas.

A maioria dos scanners de CR captura a imagem da placa de imagem (IP) com uma resolução fixa, expressa em pixels por mm (e.g., 10 pixels/mm = 100 μ m por pixel). Essa densidade de pixels inicial é o que estabelece a resolução espacial básica ou o tamanho efetivo dos pixels da imagem digital. Quando a densidade de pixels adquirida excede a capacidade de exibição de um monitor, o software pode interpolar pixels para uma densidade menor, correspondendo à capacidade do monitor. No entanto, em áreas ampliadas, o monitor pode exibir a densidade total. Impressoras digitais avançadas geralmente lidam com densidades maiores que monitores.

Em geral, quanto maior a densidade de pixels exibida, maior a resolução visual da imagem. Portanto, a resolução final da imagem é uma combinação da densidade de pixels da imagem digitalizada (entrada) e da saída visual (monitor ou impressão).

A resolução, medida em unidades de comprimento, é tipicamente avaliada em radiografia computadorizada (CR) usando um medidor de pares de linhas, um dispositivo que possui uma série de linhas paralelas (ou barras de imagem). Essas linhas, cuja frequência espacial aumenta ao longo do dispositivo, são capturadas através de uma exposição do sistema CR (como ilustrado na Figura 3-26). A resolução da imagem digital é então definida como a última série de pares de linhas que pode ser distintamente resolvida, seja por observação visual ou por medição mecânica.

Figura 3-26- Determinando a resolução dos sistemas de imagem



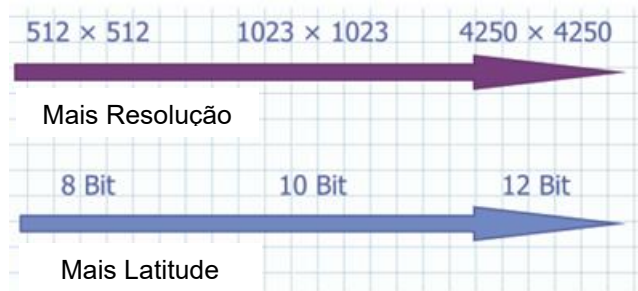
Fonte: ASTM E2007-10

A Figura 3-26 ilustra a avaliação de um medidor de função de transferência de modulação (MTF) usando um perfil de pixel, com os valores sobrepostos indicando as mudanças de frequência espacial. Para métodos visuais e manuais, a resolução atinge um limite de aproximadamente cinco linhas por milímetro, ou seja, 100 micrômetros (0,004 polegadas). A "resolução" é um parâmetro vital de qualidade de imagem que descreve a capacidade de um sistema digital em distinguir múltiplas características próximas como elementos separados. Já a "resolução espacial básica" define o tamanho efetivo de pixel necessário para alcançar um determinado nível de resolução.

É importante notar que esses métodos científicos de avaliação não substituem as técnicas práticas de radiografia computadorizada no dia a dia, onde indicadores de qualidade de imagem como placas e fios são eficazmente utilizados. Sistemas de imagem digital têm a capacidade única de processar contraste e ruído a ponto de detalhes dependentes da resolução poderem ser subestimados ou passarem despercebidos. Portanto, o objetivo das avaliações independentes de contraste, ruído e resolução é garantir que os sistemas de imagem digital não apresentem "deficiência de resolução" e que mantenham a capacidade de detectar características como desejado para as aplicações do usuário.

A qualidade da imagem digital em CR está diretamente ligada à profundidade de bits (número de tons de cinza) e à quantidade de pixels, conforme ilustrado na Figura 3-27. Em geral, mais pixels e tons de cinza resultam em melhor qualidade de imagem digital. No entanto, um aumento nesses dois fatores também leva a um maior tamanho do arquivo de imagem, medido em megabytes.

Figura 3-27- Densidade de pixels e profundidade de bits vs. qualidade da imagem



Fonte: ASTM E2007-10

A qualidade da imagem em sistemas radiológicos modernos, incluindo Radiografia Computadorizada (CR) e sistemas de filme, depende de um equilíbrio entre contraste, nível de ruído e resolução. Teoricamente, um não existe sem o outro. Embora tanto CR quanto filme combinem esses atributos, eles o fazem de maneiras diferentes. Geralmente, a CR tende a usar níveis de contraste mais altos e resolução mais baixa que o filme para atingir a qualidade de imagem desejada. Isso frequentemente faz do nível de ruído o atributo de controle primário para ambas as modalidades. Em sistemas de filme, o ruído é controlado principalmente pela variação da granularidade do filme. Em CR, um efeito similar é obtido através da relação contraste-ruído (CNR).

Considerando que as diferenças de resolução entre sistemas são muitas vezes fixas, qualquer vantagem de contraste da CR pode ser anulada se o nível de ruído não for mantido em patamares aceitáveis. Desse modo, a CNR se torna um atributo crucial para comparar sistemas CR ou ao modificar seus componentes de hardware/software. Em muitas técnicas de CR, o ruído pode ser o fator físico predominante para se alcançar resultados satisfatórios. Em termos simples, a falta de controle do ruído na imagem pode comprometer a sensibilidade ao contraste da CR, resultando em uma CNR reduzida e na incapacidade de atender aos requisitos de qualidade da imagem.

O Campo de Visão (FOV) é um parâmetro técnico crucial que impacta diretamente a resolução da imagem CR. É fundamental não o confundir com o FOV óptico, pois são conceitos distintos. O FOV óptico refere-se à imagem visualizada diretamente, que pode ser ampliada radiograficamente ao se aumentar a distância entre a peça e o detector. Essa ampliação óptica não altera a densidade de pixels da imagem digital visualizada, mas geralmente reduz a qualidade da imagem devido ao aumento da falta de nitidez geométrica.

Em contraste, o campo de visão digital simula a proximidade de um observador a um objeto/imagem, alterando o tamanho do pixel exibido pelo computador. Por exemplo, pixels podem ser exibidos em 1×, 2×, 3×, etc., dando a impressão de que a imagem está ampliada ou reduzida. Para imagens CR de alta qualidade, a chave é determinar o grau ideal de ampliação digital que não comprometa a resolução e a detecção de detalhes importantes. Embora a ampliação seja uma ferramenta útil, pode-se atingir um ponto de retorno decrescente onde a perda de resolução supera os benefícios do aumento do tamanho da imagem.

3.4.3 Imagem Radiográfica Digital

A radiografia pode ser visualizada de duas formas principais: a maneira convencional, que utiliza filmes radiográficos, e a digital, que oferece maior flexibilidade e processamento. A radiografia digital, por sua vez, subdivide-se em direta e indireta. A radiografia digital direta é um processo imediato: detectores especializados, como os de TFT (Thin Film Transistor), capturam a imagem e a transferem automaticamente para um computador, sem a necessidade de etapas intermediárias. Já a radiografia digital indireta, também conhecida como radiografia computadorizada, envolve uma etapa posterior de digitalização. Nesse método, a imagem é inicialmente gravada em um tipo de filme específico, como o Imaging Plate, e só depois é escaneada e convertida para o formato digital. Isso significa que, até mesmo uma radiografia convencional em filme pode ser transformada em uma radiografia digital indireta, bastando ser digitalizada.

Para garantir a máxima precisão e qualidade das imagens digitais e superar as limitações inerentes aos digitalizadores ou sensores, é fundamental aplicar operações de calibração. O objetivo principal dessas operações é cancelar as "não linearidades"

dos equipamentos, preservando a linearidade e a fidelidade da imagem final. Em termos mais simples, queremos que a imagem digital seja uma representação exata e sem distorções do que foi capturado, eliminando quaisquer ruídos ou variações que o próprio sensor possa introduzir.

Os dados brutos obtidos pelos sensores requerem um processamento meticuloso que utiliza diferentes tipos de exposições para calibração. As exposições de viés (bias) são capturas realizadas com tempo de exposição nulo; elas servem para medir o ruído eletrônico de fundo que o sensor gera, mesmo sem receber luz, estabelecendo um "ponto zero" de referência. Já os campos-absolutos (flat-fields) são exposições onde todos os pixels são submetidos à mesma intensidade de luz de forma uniforme. Esses são obtidos expondo o sensor a uma tela homogênea e iluminada por uma fonte ou, no caso da Tomografia Computadorizada, a um vaso com água. O propósito dos flat-fields é identificar e corrigir as diferenças na sensibilidade de cada pixel do sensor e as variações na iluminação que podem ocorrer em toda a área do chip.

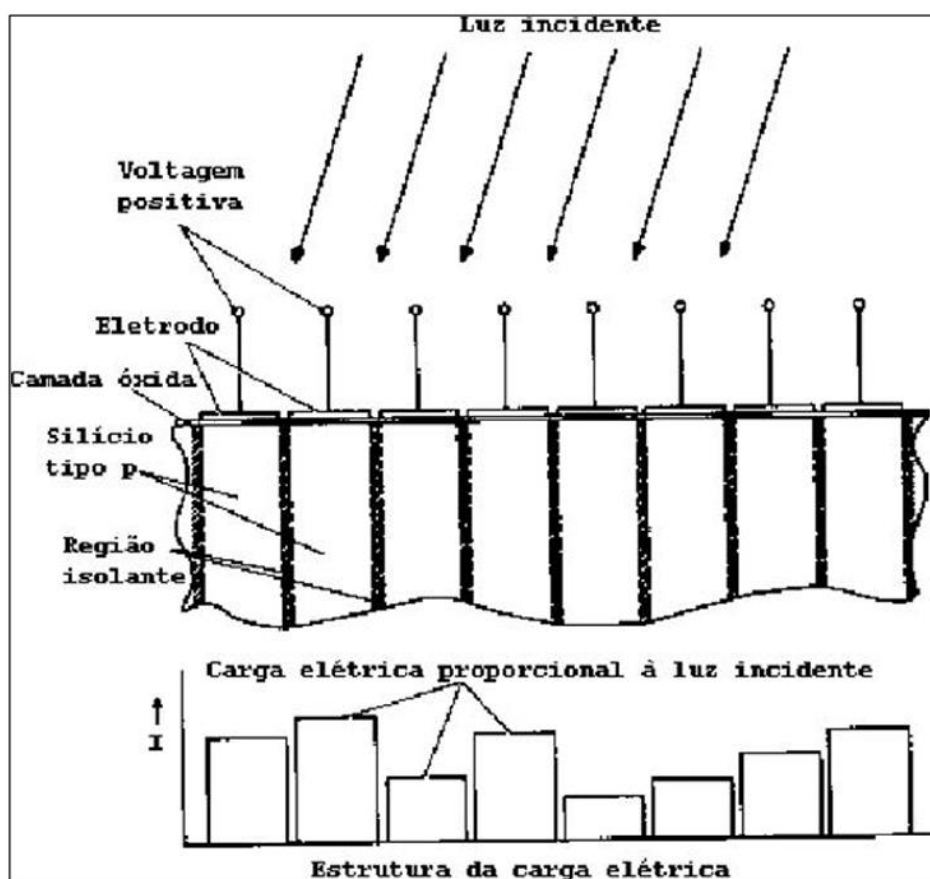
O principal objetivo desses dados de calibração é remover efeitos indesejados da imagem. Os dados de viés, por exemplo, ajudam a eliminar efeitos aditivos como o nível do pedestal eletrônico (medido na região de super-escaneamento da imagem), o nível de pré-cintilação (também medido nas imagens de viés) e, se necessário, a corrente escura. A corrente escura é um tipo de ruído eletrônico gerado pelo sensor em longas exposições, mesmo sem luz, e é medida em imagens chamadas "darks". Por outro lado, os dados de campos-absolutos são cruciais para remover ganhos multiplicativos, que são as diferenças de ganho pixel a pixel, e variações na iluminação através de todo o chip do sensor.

Para obter a imagem radiográfica digital final com a mais alta qualidade, uma sequência específica de processamento é seguida. Primeiramente, as imagens são subtraídas do viés, medido na região de super-escaneamento. Em seguida, são recortadas para eliminar essa região e quaisquer defeitos nas bordas do CCD (Charge Coupled Device), que é um tipo comum de sensor de imagem. Após isso, as imagens de viés são subtraídas novamente. Finalmente, as imagens corrigidas são divididas por uma imagem do campo-absoluto médio, obtido com o filtro correspondente à imagem original, garantindo assim que todas as variações e ruídos do sensor sejam

adequadamente compensados, resultando em uma imagem clara e precisa para análise (Taguchi, 2004).

Na Figura 3-28, há uma explicação mais detalhada da necessidade de cada um desses passos e como são feitos.

Figura 3-28- Passos necessários para uma maior linearidade na digitalização de imagens.



Fonte: Taguchi, 2004.

O primeiro passo é a subtração do super-escaneamento e recorte. Isso envolve calcular uma média das colunas de uma área específica da imagem (o super-escaneamento), ajustar uma função suave a essa média e subtrair o resultado de toda a imagem. Em seguida, essa região de super-escaneamento e as bordas com defeitos são recortadas, mantendo apenas os dados úteis. Esse procedimento é aplicado a todos os tipos de imagens usadas na calibração: viés, campos-absolutos, imagens escuras e a própria imagem do objeto (o que está sendo analisado).

Em seguida, o texto aborda a correção usando as imagens de viés. Se a imagem foi "pré-exposta" à luz para otimizar os pixels (torná-los mais lineares ou melhorar a transmissão de elétrons), haverá um ruído residual. As imagens de viés

são combinadas para minimizar ruídos, raios cósmicos e remover pixels defeituosos. A imagem de viés resultante é, então, subtraída de todas as outras imagens (campos-absolutos, imagens escuras e a imagem do objeto).

Para longas exposições, há também a necessidade de remover a corrente de escuro, um ruído gerado pelo próprio sensor. Isso é feito utilizando "imagens escuras", que são tomadas com o diafragma fechado e passam por todo o pré-processamento descrito anteriormente.

O passo final é a correção do campo-absoluto. Esta correção remove as variações na sensibilidade de cada pixel. As imagens de campo-absoluto são combinadas (agrupadas por filtro) e normalizadas. Por fim, a imagem do objeto é dividida pelo campo-absoluto correspondente ao filtro usado, garantindo uma imagem final corrigida e precisa.

O procedimento para esta etapa pode ser demonstrado através da equação:

$$N_s(i) = [N_e(i) - \text{super} - \text{escaneamento} - \text{Zero}(i)] / \text{Campo} - \text{absoluto} \quad (12)$$

onde $N_s(i)$ se refere ao número de contagens em cada pixel na imagem final (i varia de 1 ao número total de pixels), $N_e(i)$ se refere ao número de contagens em cada pixel na imagem inicial, super-escaneamento é o viés da coluna de leitura, $\text{Zero}(i)$ é o viés de cada pixel, e Campo-absoluto é a média final de todos os campos-absolutos já normalizada.

Para analisar uma imagem, é preciso que esta esteja em forma digital. Se a imagem inicial for fotográfica, é preciso passá-la por um digitalizador (scanner). O processamento da imagem inclui transformações, realce ou aprimoramento, restauração, compressão, registro e reconstrução.

3.5 Processamento de imagens Radiográfica Digital

A revolução digital, impulsionada pelo surgimento e aprimoramento dos computadores, figura, sem dúvida, entre os eventos mais impactantes do século passado. A aplicação dos computadores, antes restrita a nichos como o meio acadêmico para processamento de dados, hoje permeia virtualmente todas as camadas da sociedade, desde a execução de tarefas básicas de trabalho até o entretenimento. Paralelamente a essa disseminação, o advento e a crescente

utilização de métodos computacionais para o melhoramento de imagens ganharam destaque. Esse avanço foi crucial para a interpretação humana e para o processamento, armazenamento, transmissão e representação de dados em sistemas autônomos de interpretação de imagens.

As primeiras aplicações de processamento de imagens remetem à indústria de jornais nos anos 1920. Naquela época, fotos eram enviadas por um cabo telegráfico submarino conectando Londres e Nova York, um feito que reduziu o tempo de envio de semanas para menos de 3 horas. Equipamentos especializados eram responsáveis por recodificar e reconstruir a imagem para posterior impressão. A Figura 2-20 ilustra uma dessas imagens transmitidas e reproduzidas por uma impressora telegráfica da época. Um dos maiores desafios nesse processo era a melhoria da qualidade visual das imagens e a distribuição dos níveis de intensidade. Esse método de impressão foi descontinuado no final de 1921, sendo substituído por uma técnica baseada na reprodução fotográfica, realizada por fitas perfuradas pelo equipamento de recepção telegráfica ao final da linha. A Figura 2-29 demonstra as significativas melhorias na qualidade das imagens alcançadas por esse novo método (GONZALEZ; WOODS, 2001).

Figura 3-29- Imagem digital transmitida pelo cabo submarino nos anos 20 entre Londres e Nova Iorque.



Fonte: Gonzalez; Woods, 2001.

Figura 3-30- Imagem digital transmitida via cabo submarino, mas reproduzida por método de perfuração de uma fita e um equipamento.



Fonte: Gonzalez; Woods, 2001.

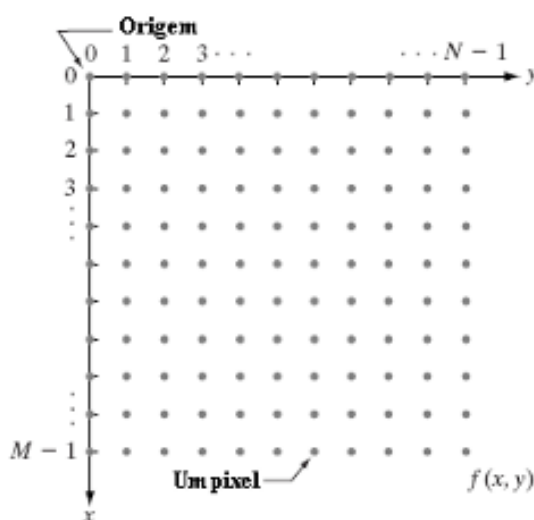
Desde as primeiras aplicações telegráficas, as técnicas de representação e processamento de imagens digitais evoluíram de forma notável. A partir da década de 1960, essa evolução foi impulsionada significativamente pelo desenvolvimento contínuo de computadores mais rápidos e acessíveis, resultando em um crescimento vigoroso na área.

Uma imagem monocromática pode ser matematicamente expressa como uma função bidimensional, $f(x,y)$, onde x e y representam as coordenadas espaciais. A amplitude da função f para cada par de coordenadas (x,y) é denominada intensidade de luz ou nível de cinza da imagem naquele ponto. Quando os valores de x , y e f são todos finitos e discretos, a imagem é classificada como imagem digital.

Uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, cada um com uma localização e um valor específicos. Esses elementos são chamados de pixels. Como essa imagem é formada por pixels, sua distribuição espacial em um plano bidimensional é realizada utilizando uma representação matricial. Assim, a matriz que representa a função $f(x,y)$ terá M linhas e N colunas.

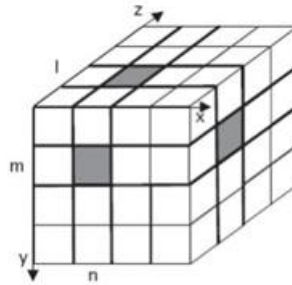
Por exemplo, as coordenadas na origem são $(x,y) = (0,0)$. O próximo valor das coordenadas ao longo da primeira linha seria $(x,y) = (0,1)$, e assim por diante. A Figura 3-31 ilustra esse conceito de coordenadas espaciais. É importante notar que espaços tridimensionais também podem ser utilizados para a representação de imagens digitais. Nesse contexto, o elemento unitário de volume é chamado de voxel, conforme representado na Figura 3-31.

Figura 3-31- Convenção de coordenadas para representar uma imagem digital.



Fonte: Gonzalez; Woods, 2001.

Figura 3-32- Representação de uma imagem digital por uma coleção de pontos discretos em uma grande retangular 3-D.



Fonte: Jahne, 2002.

A matriz que representa os valores da função $f(x,y)$ para cada coordenada (x,y) pode ser representada na seguinte forma:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0, N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1, N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (13)$$

O lado direito dessa equação é por definição uma imagem digital e seus elementos constituintes são os pixels.

Em alguns casos, é mais conveniente usar uma notação mais simples para representar uma imagem digital e seus elementos:

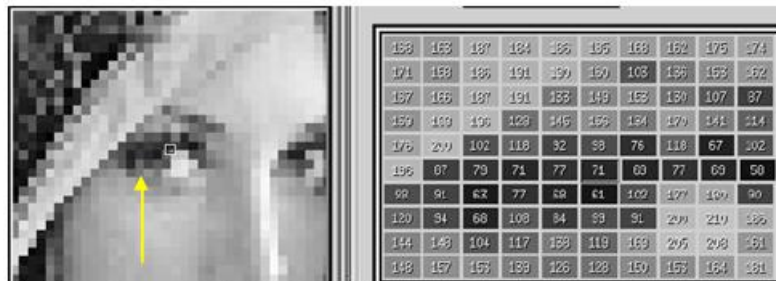
$$A = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,N-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{M-1,0} & a_{M-1,1} & \dots & a_{M-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Logo, as equações 1 e 2 são idênticas.

A Figura 3-33 demonstra a representação matricial de uma imagem, focando em uma pequena região em destaque. Nesta representação, os valores contidos nos pixels correspondem à intensidade dos níveis de cinza da área. O exemplo ilustrado apresenta uma matriz de 10×10 , o que significa que a região é composta por 10 pixels de largura e 10 pixels de altura. Cada célula dessa matriz armazena o valor de

intensidade do pixel correspondente, permitindo que a imagem seja processada e manipulada digitalmente.

Figura 3-33- Ponto destacado sobre a imagem e sua matriz de pixels 10x10.

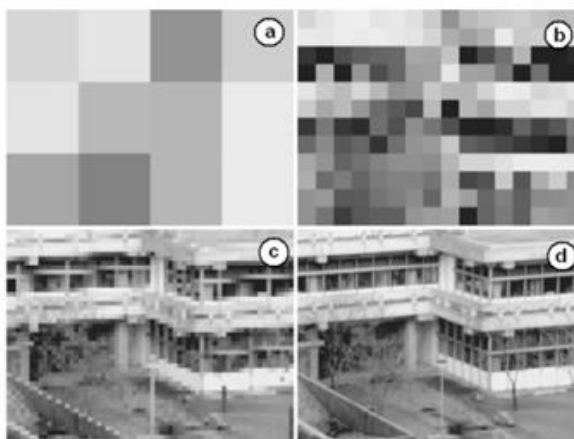


Fonte: Falcão e Leite, 2000.

Em imagens digitais bidimensionais, a resolução espacial é definida pelo número de pixels presentes nas dimensões horizontal e vertical. Por exemplo, uma imagem com resolução espacial de 800×600 pixels (totalizando 480.000 pixels) indica que ela possui 800 pixels de altura e 600 pixels de largura.

Fica evidente que, em um plano de representação da imagem, quanto maior o número de pixels em cada dimensão, ou quanto maior o produto do número de pixels nas duas dimensões, melhor será a resolução da imagem. Em outras palavras, mais pixels significam mais detalhes e uma imagem mais nítida. A Figura 3-34 ilustra visualmente como o número de pixels impacta diretamente a resolução de uma imagem.

Figura 3-34- Representação de uma imagem digital com (a) 3x4, (b) 12x16, (c) 48x64 e (d) 192x256 pixels.



Fonte: Jahne, 2002.

Em imagens digitais, particularmente nas monocromáticas, os valores da função $f(x,y)$ representam os níveis de cinza. O número total de níveis de cinza possíveis é comumente expresso como uma potência de 2, devido à natureza binária da computação. Por exemplo, se uma imagem possui 256 níveis de cinza, significa que a intensidade pode variar de 0 a 255. Como 256 é 2^8 , o computador requer um máximo de 8 bits para armazenar as informações de cada pixel.

Nesse caso, dizemos que a profundidade da imagem é de 8 bits por pixel (equivalente a 1 byte por pixel). Isso define a gama de tons que a imagem pode exibir. A Figura 3-35 ilustra a representação digital de uma imagem onde a resolução espacial foi mantida constante, mas a profundidade variou: de 8 bits por pixel (256 níveis de cinza) para 4 bits por pixel (16 níveis de cinza), e, finalmente, para 2 bits por pixel (resultando em uma imagem binária). Essa variação demonstra como a profundidade de bits afeta a riqueza tonal da imagem, com mais bits permitindo uma gradação de cinzas mais suave e detalhada.

Figura 3-35- Representação de uma imagem digital com profundidades (a) 8, (b) 4 e (c) 2 bits por pixel.



Fonte: Falcão e Leite, 2000.

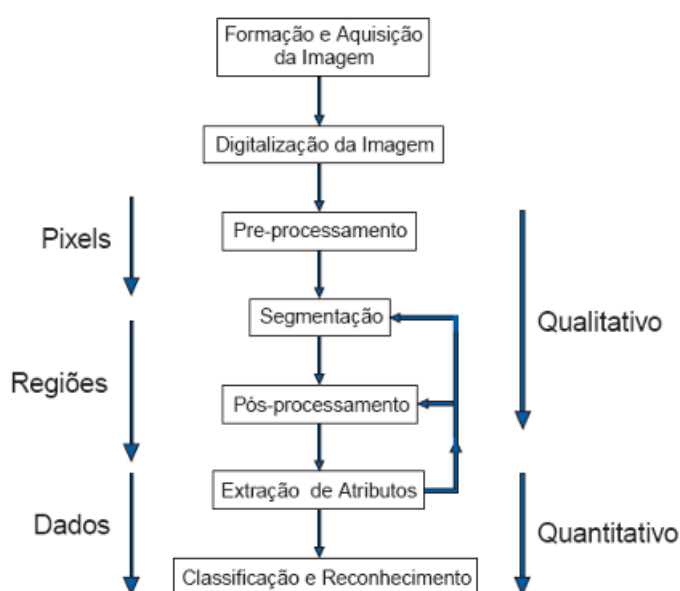
Em imagens coloridas ou multibanda, particularmente na escala RGB (Vermelho, Verde, Azul), a representação da imagem é frequentemente realizada pela combinação dessas três cores primárias. Nesse modelo, cada cor corresponde a uma "banda" separada, e cada banda possui sua própria matriz de valores $f(x,y)$. Esses valores, por sua vez, representam a intensidade ou tom de cada cor naquele ponto específico. Por exemplo, na matriz da banda vermelha, os valores podem variar do vermelho mais escuro ao mais claro.

É importante ressaltar que o órgão visual humano possui limitações significativas na distinção de certas diferenças de tons e na percepção de detalhes

sutis em uma imagem. Por essa razão, no contexto das imagens digitais, o processamento torna-se essencial. O objetivo é realizar melhorias na imagem e destacar informações que, de outra forma, seriam imperceptíveis ao olho humano.

O processamento de imagens digitais envolve diversas etapas, que podem variar ligeiramente dependendo da área de estudo. Contudo, Esquef e Albuquerque (2003) propõem uma sequência comum, que inclui, em ordem: formação e aquisição da imagem, digitalização, pré-processamento, segmentação, pós-processamento, extração de atributos e classificação e reconhecimento. A Figura 3-36 ilustra um fluxograma detalhado que abrange todas essas etapas, juntamente com as características principais de cada fase do processo de tratamento de imagens.

Figura 3-36- Etapas de um sistema de PDI.



Fonte: Esquef e Albuquerque, 2003.

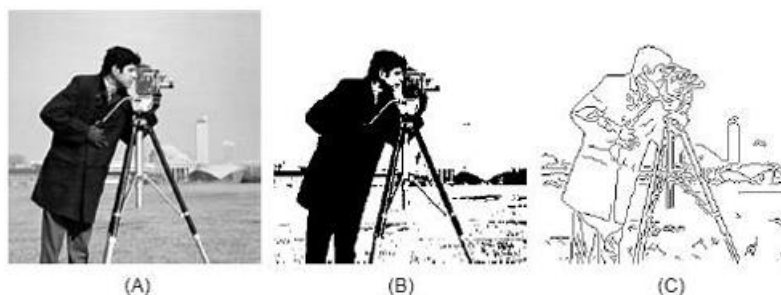
O processo de manipulação de imagens digitais começa com a formação e aquisição da imagem, que se refere à sua captura e à obtenção dos dados visuais. Imediatamente após, ocorre a digitalização, onde esses dados são convertidos em sinais elétricos que o computador consegue interpretar.

Em seguida, o pré-processamento entra em cena. Nesta fase, são realizadas modificações em atributos da imagem, como o contraste. Também podem ser aplicados filtros específicos, que utilizam máscaras para alterar os valores dos pixels na matriz que representa a imagem digital. Em imagens monocromáticas, essas

alterações nos valores dos pixels impactam diretamente os níveis de cinza da imagem.

A etapa de segmentação é fundamental para o processamento de imagens, pois consiste em particionar ou separar partes ou objetos constituintes da imagem que possuam relevância. Algoritmos de reconhecimento de objetos em imagens, que dependem da segmentação, são notoriamente complexos de desenvolver. Os "objetos" destacados na imagem são, em essência, grupos de pixels que compartilham características específicas. A Figura 3-37 ilustra dois métodos distintos de segmentação: a binarização (transformação em imagem preto e branco) e a segmentação por detecção de bordas ou contornos.

Figura 3-37- Duas abordagens para segmentação. (A) Imagem original em níveis de cinza. (B) Imagem segmentada através de uma binarização. (C) Imagem segmentada por detecção de bordas.



Fonte: Esquef e Albuquerque, 2003.

As técnicas de segmentação em imagens digitais geralmente se baseiam em duas abordagens principais: a similaridade entre pixels e a descontinuidade entre eles.

A abordagem mais comum baseada em similaridade é a binarização. Essa técnica é empregada quando as amplitudes dos níveis de cinza são suficientes para caracterizar os "objetos" dentro da imagem. Na binarização, um nível de cinza específico é definido como um limiar de separação entre os pixels que compõem os objetos e o fundo da imagem. O principal objetivo dos diversos métodos de binarização existentes é determinar esse limiar de forma otimizada para uma segmentação eficaz da imagem.

Já as técnicas baseadas em descontinuidades entre os pixels buscam identificar variações abruptas no nível de cinza entre pixels vizinhos. Essas variações, em geral, permitem a detecção do grupo de pixels que delineiam os contornos ou bordas dos objetos na imagem. A técnica de segmentação mais utilizada com base em descontinuidade é a detecção de bordas (ESQUEF; ALBUQUERQUE, 2003).

Após a segmentação, a etapa de pós-processamento é crucial para corrigir quaisquer defeitos ou imperfeições resultantes da fase anterior. Para isso, são frequentemente utilizados filtros matemáticos, conhecidos como morfológicos, que realizam uma análise quantitativa dos pixels da imagem, aprimorando a qualidade e a precisão da segmentação final.

Na morfologia matemática, duas operações fundamentais são amplamente empregadas: a erosão e a dilatação. A erosão é utilizada para separar objetos que estão em contato, enquanto a dilatação permite preencher buracos dentro de um objeto ou conectar objetos distintos. Por serem operações iterativas, é possível executar sequências de operações sucessivas ou alternadas de erosão e dilatação.

Duas combinações importantes dessas operações são:

- **Abertura:** Consiste em uma erosão seguida de uma dilatação. Seu propósito é eliminar pequenas partículas na imagem e suavizar o contorno dos objetos, removendo ruídos indesejados.
- **Fechamento:** É o inverso da abertura, consistindo em uma dilatação seguida de uma erosão. Essa operação visa fechar canais estreitos que separam objetos ou suprimir pequenos furos em seu interior, conectando regiões e preenchendo pequenas falhas.

A próxima etapa é a extração de atributos, onde informações úteis são retiradas da imagem processada. Um passo crucial nessa fase é a rotulação ou *labelização*. Após a segmentação, a imagem apresenta regiões correspondentes aos "objetos" separadas do "fundo". Nesse ponto, as regiões de interesse são agrupadas por pixels que se tocam. O passo seguinte é atribuir um rótulo (label) exclusivo a cada um desses grupos de pixels.

O processo de segmentação estabelece um delimitador entre as regiões pertencentes às células e aquelas que formam o fundo. A etapa de *labelização*, então, cria um rótulo que identifica cada uma dessas regiões. Isso permite que os processos subsequentes de tratamento da informação sejam concentrados e aplicados individualmente em cada região rotulada, facilitando análises e extrações de dados mais precisas.

O processamento digital de imagens pode ser implementado em diversas linguagens de programação. A linguagem C é a mais utilizada para esse fim, devido

à sua eficiência e capacidade de lidar com operações de baixo nível. Além disso, é possível utilizar linguagens internas de softwares específicos desenvolvidos para processamento de imagens, oferecendo ambientes mais integrados para manipulação e análise de dados visuais.

Objetivo de processamento de imagem digital visa melhorar a qualidade da imagem radiográfica obtida por um sistema radiográfico fazendo melhor percepção humana: melhorar a sensibilidade e contraste, renderizar detalhes de modo que defeitos de pequena dimensão possam ser identificados, caracterização quantitativa e precisa através de melhoramento e destaque das bordas (edges), fazer que os dados obtidos sejam arquivados e transmitidos.

Uma imagem digital é, na verdade, um grande quebra-cabeça invisível, feito de milhares ou milhões de quadradinhos minúsculos chamados pixels. Cada um desses quadradinhos tem um código numérico que diz qual cor ou tom ele deve exibir. Para guardar toda essa informação, o computador usa uma linguagem muito simples: os bits. Cada bit é como uma chavinha que só pode estar ligada (1) ou desligada (0). Quando você junta vários desses bits, forma um byte. São esses bits e bytes que servem para representar cada pixel da imagem.

A qualidade de uma imagem digital depende de dois fatores principais:

O primeiro é a resolução espacial, que diz respeito à clareza e ao nível de detalhe que conseguimos ver. Basicamente, é a menor distância entre dois pontos da imagem que ainda podemos distinguir um do outro. Imaginemos que a imagem é feita de pequenos quadrados, os pixels. O tamanho e a quantidade desses pixels são cruciais para ver os detalhes. Se um pixel for muito grande, ele vai cobrir várias coisas ao mesmo tempo, e tudo o que estiver dentro dele vai aparecer com uma única cor ou tom de cinza. Por exemplo, se você tem uma bolinha e uma linha fininha dentro de um pixel grande, o pixel só vai mostrar a cor média das duas, e você não vai conseguir ver a bolinha nem a linha separadamente. Por isso, para ter uma boa resolução e ver detalhes finos, precisamos de pixels pequenos e em grande quantidade, ou seja, uma imagem com muitos pixels.

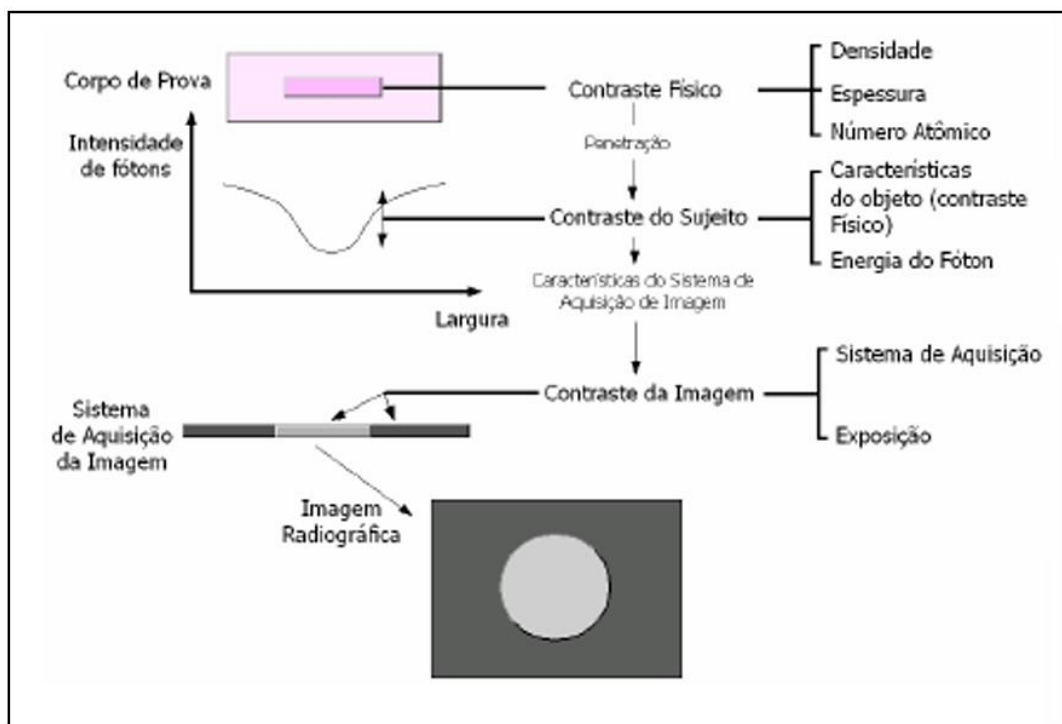
O segundo fator importante é a quantidade de bits usada para representar cada pixel. Isso afeta a variedade de tons de cinza ou de cores que a imagem pode exibir. Se pensarmos que cada pixel pode ter apenas algumas opções de cor (poucos bits), a imagem vai parecer mais "chapada", com transições bruscas entre as tonalidades.

Mas se cada pixel pode ter muitas opções de cor (mais bits), a imagem vai mostrar uma gama maior de tons, com transições mais suaves e detalhes mais ricos no brilho e na sombra.

O contraste é a capacidade de diferenciar estruturas próximas em uma imagem, tornando-as visíveis. Ele depende da espessura e da composição do objeto inspecionado, e pode ser classificado em três tipos:

- O contraste do objeto refere-se à diferença de densidade ou composição química entre um objeto e o meio em que ele está. Para ser visível, o objeto precisa ter um contraste físico em relação ao seu entorno, que é proporcional à sua densidade e espessura.
- O contraste do sujeito surge após a radiação interagir com o objeto. Devido às diferentes características das estruturas, a energia da radiação que emerge do objeto (formando a "imagem área") é diferente da que entrou. O contraste do sujeito é a variação de exposição em diferentes pontos dessa "imagem área", sendo influenciado não só pelo contraste do objeto, mas também por fatores como a tensão da radiação, o material do ânodo, o ripple e a filtração.
- Por fim, o contraste da imagem (ou radiográfica) é o contraste final que vemos no filme ou na imagem digital. Ele é determinado pelas características das estruturas do objeto (como espessura, densidade e distribuição de energia dos fótons que emergem), além das propriedades do filme radiográfico e do processo de revelação ou digitalização da imagem.

Figura 3-38- Estágios de formação do contraste da imagem.



Fonte: Sprawls, 1995.

Principais fatores que afetam o contraste:

- Radiação Espalhada
- Energia do Feixe de Radiação

A nitidez da imagem radiográfica se refere à clareza com que conseguimos ver os detalhes. É a capacidade de observar as linhas finas e as bordas bem definidas das estruturas dentro da imagem. Quando essa clareza é insuficiente, a imagem aparece com "borramento" ou desfoque. Idealmente, cada pequeno ponto no objeto que está sendo radiografado deveria ser representado por um ponto igualmente pequeno e nítido na imagem final. No entanto, na prática, isso nunca acontece perfeitamente. Sempre haverá um certo grau de borramento nas representações das estruturas, o que significa que as bordas e os detalhes nunca serão absolutamente perfeitos e definidos. Esse borramento é uma limitação inerente ao processo de formação da imagem radiográfica.

Principais fatores que afetam a nitidez da imagem:

- Distribuição da intensidade do feixe no ponto focal
- Fatores geométricos
- Tamanho finito do ponto focal

O ruído em uma imagem digital se manifesta como variações aleatórias na intensidade do sinal, que acabam prejudicando a capacidade de ver detalhes. Isso é especialmente problemático para objetos pequenos ou que já possuem um baixo contraste. Existem diversas fontes de ruído na imagem. Uma das principais é a natureza aleatória com que os fótons de radiação (as partículas de luz ou energia) são distribuídos durante a formação da imagem. Essa aleatoriedade é chamada de ruído quântico.

Existem vários tipos de fontes de ruídos que podem contribuir para o ruído geral na imagem final, os mais importantes são:

- Ruído de quanta nos raios-X
- Ruído de Luminescência
- Ruídos da estrutura do IP
- Ruídos de quantização
- Ruídos eletrônicos

Em sistemas eletrônicos e digitais, ruído é qualquer sinal indesejado que atrapalha a detecção ou o processamento da informação que realmente nos interessa. Esse ruído compromete o desempenho do sistema, por isso é fundamental medir a razão entre o sinal desejado e o ruído, conhecida como razão sinal-ruído (SNR).

Quanto maior for essa razão, melhor será a qualidade da imagem e a visualização dos detalhes. Em uma imagem digital, podemos calcular a razão sinal-ruído dividindo a média dos valores de intensidade de uma determinada região da imagem pelo seu respectivo desvio padrão. Essa medição geralmente é feita com o auxílio de um programa de processamento de imagem. A SNR é calculada pela equação

$$= \frac{S}{\sigma} \quad (15)$$

onde,

$$S = \frac{1}{ixj} \sum_{i,j} X_{i,j} = \bar{X} \quad (16)$$

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

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.

3.5.1 Avaliação da Qualidade de Imagem Radiográfica com Raios-X de Alta Energia Utilizando IQI de Fio-duplo

A necessidade do controle de qualidade é enfatizada ao longo de qualquer sistema de produção. Medição e rastreabilidade do desempenho dos equipamentos e garantia de precisão, são fundamentais no estabelecimento correto das práticas de trabalho. Verificar o desempenho de um sistema radiográfico para fins de garantia da qualidade, historicamente tem sido uma tarefa árdua, com diferentes padrões e indicadores de testes múltiplos e exposições. Há vários fatores que afetam a qualidade de uma imagem do sistema de radiografia computadorizada (CR), incluindo geometricunsharpness, que significa indefinição geométrica, representado por uma penumbra na imagem decorrente do espalhamento dos fótons, a resolução espacial, nitidez, sensibilidade, contraste (sinal/ruído).

Para este fim usam-se Fantomas, que são elementos de testes necessários para uma unidade simples, permitindo que a avaliação da CR para sistemas de radiografia industrial, de acordo com a norma ASTM e EN462-5.

O uso regular dos Fantomas irá garantir, a longo prazo, a estabilidade e desempenho das medições do sistema CR ao longo do ciclo de vida dos dispositivos. Um dos Fantomas mais utilizados é o Indicador de Qualidade de Imagem de Fio-Duplo (IQI duplex, Figura 3-39) que já existe há décadas, mas não é comumente usado em radiografia convencional, por causa do seu alto custo e limitadas possibilidades de aplicação, no entanto, é cada vez mais utilizadas em radiografia digital, uma vez que é perfeitamente adequada em muitas aplicações de raios-X, especialmente para avaliação do geometric unsharpness e resolução espacial em imagens digitais.

Figura 3-39- IQI de fio-duplo

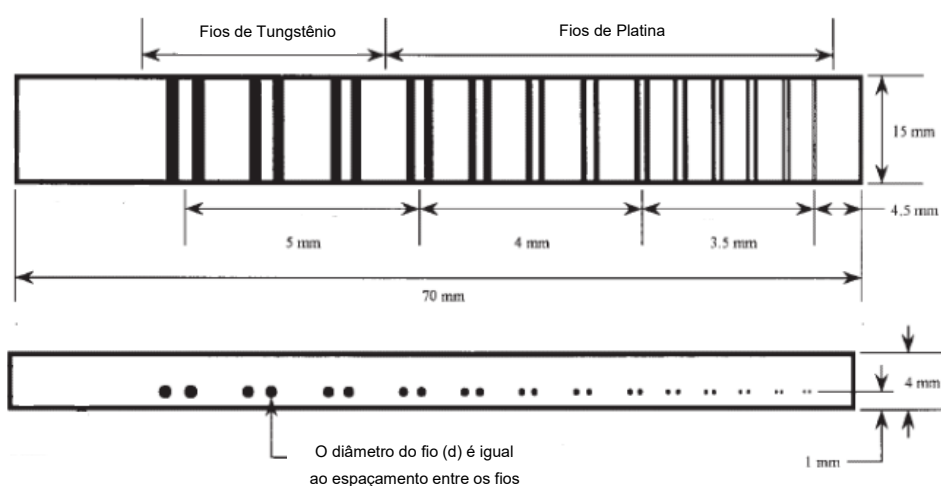


Segundo Halmshaw (1995), embora os IQIs (Indicadores de Qualidade de Imagem) sejam ferramentas importantes na radiografia industrial, sua utilidade é, de fato, bastante específica e limitada. Eles servem primordialmente para verificar até certo ponto a técnica radiográfica utilizada, ajudando a assegurar que o processo está sendo conduzido corretamente. Além disso, os IQIs podem ser empregados para avaliar a qualidade geral das radiografias quando não há informações sobre a técnica específica que foi aplicada.

Outra aplicação valiosa é a comparação entre diferentes técnicas radiográficas, permitindo identificar qual abordagem oferece melhores resultados para determinadas situações. No entanto, é crucial entender que a assistência que os IQIs oferecem na avaliação das dimensões das falhas reveladas pela radiografia é bastante restrita. Em suma, enquanto esses indicadores são úteis para monitorar e comparar a qualidade das imagens em certos aspectos, eles não fornecem uma análise completa ou detalhada de todos os elementos que podem ser relevantes em um exame radiográfico.

O IQI duplex consiste em um número de pares ("Duplex") de fios ou tiras finas de platina ou de tungstênio, de tamanho cada vez menor e diminuindo distâncias para cada par onde 13 pares de fios são dispostos conforme a Figura abaixo.

Figura 3-40- Dimensões da estrutura do IQI Duplex



Fonte: CIT, 2003

Os 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 Figura 3-30 de acordo com a norma. O espaçamento entre os fios é igual ao diâmetro dele.

Os 13 elementos são fixados em um suporte plástico rígido. É possível usar medidores com mais de 13 elementos, especialmente se você precisar determinar valores de nitidez inferiores a 0,1 mm ou valores de resolução espacial básica abaixo de 0,05 mm (ASTM E2002-22).

A tabela a seguir descreve a numeração dos elementos, a penumbra geométrica correspondente, o diâmetro dos fios que também corresponde o espaçamento entre os fios.

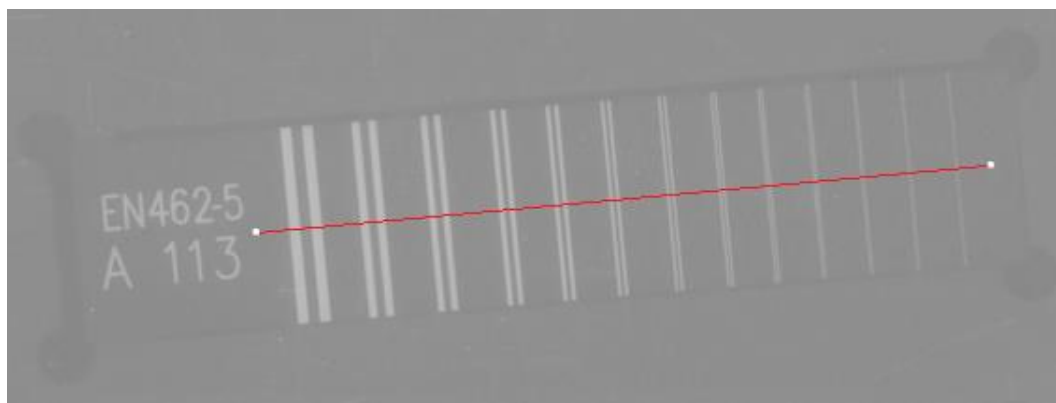
Tabela 3-6- Parâmetros do indicador de qualidade do IQI Duplex.

| Elemento Duplex (D) | <i>Geometric Unsharpness</i> Correspondente | Diâmetro do Fio (mm) |
|---------------------|--|----------------------|
| 13D | 0.10 | 0.050 |
| 12D | 0.13 | 0.063 |
| 11D | 0.16 | 0.080 |
| 10D | 0.20 | 0.100 |
| 9D | 0.26 | 0.130 |
| 8D | 0.32 | 0.160 |
| 7D | 0.40 | 0.200 |
| 6D | 0.50 | 0.250 |
| 5D | 0.64 | 0.320 |
| 4D | 0.80 | 0.400 |
| 3D | 1.00 | 0.500 |
| 2D | 1.26 | 0.630 |
| 1D | 1.60 | 0.800 |

Fonte: CIT, 2003.

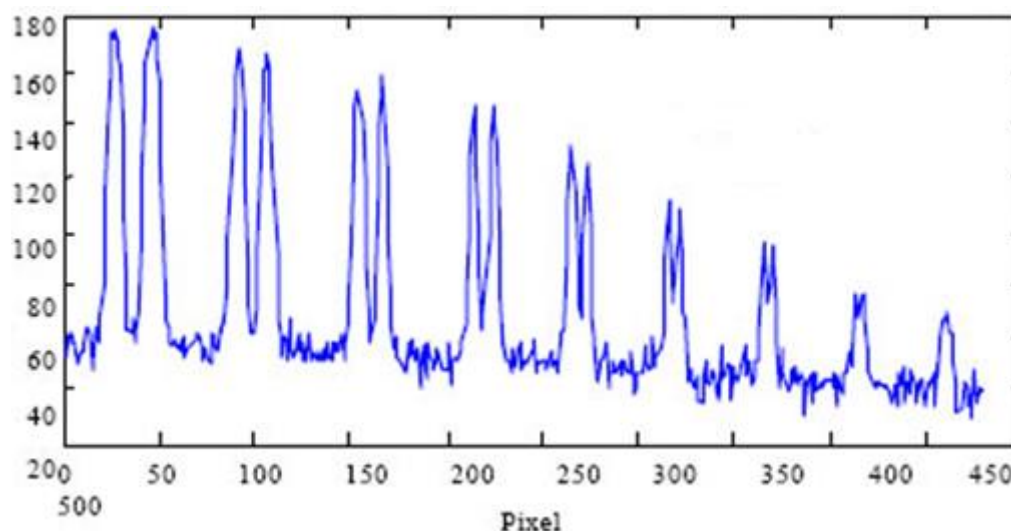
Com base no perfil de linha gerada criando uma Região de Interesse (ROI) na imagem passando por todos os fios como mostra a figura a seguir, faz-se uma leitura dos valores dos máximos e mínimos de intensidade correspondente a cada par de fios.

Figura 3-41- Radiografia digital do IQI Duplex mostrando o ROI.



Fonte: CIT, 2003

Gráfico 3-5- Gráfico formando a função de expansão de aresta curva usando IQI duplex.



Fonte: CIT, 2003

O primeiro par de fios não resolvido é determinado quando não há uma formação definida dos picos no gráfico, sendo este o limite do sistema, para a condição aplicada.

Halmshaw (1995) relata que ao analisar os dados de um IQI, é fundamental lembrar que os resultados são inerentemente subjetivos. Mesmo quando diversos leitores experientes examinam uma radiografia em condições ideais de visualização, é pouco provável que todos concordem sobre o número exato de fios ou orifícios discerníveis na imagem do IQI.

No entanto, leitores de filme qualificados tendem a apresentar uma variação mínima, geralmente não excedendo um único elemento do IQI (seja um fio ou um

orifício). Um ponto crucial no design do IQI é o espaçamento entre seus elementos. Se os intervalos de tamanho entre os elementos sucessivos forem grandes, a dispersão nas observações será muito pequena. Por outro lado, se esse intervalo for pequeno, a dispersão será maior, o que evidencia a importância desse fator na concepção do IQI.

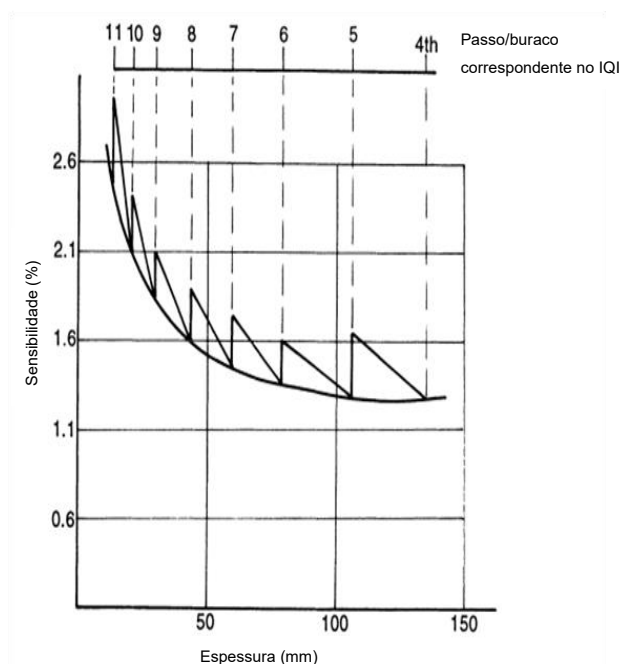
É crucial compreender que, ao utilizar um IQI específico, as sensibilidades atingíveis para qualquer espessura de amostra não formam uma curva contínua, mas sim uma série de valores discretos. Isso significa que você só pode alcançar os níveis de sensibilidade que correspondem aos elementos (fios ou orifícios) presentes no IQI.

Por exemplo, se um IQI possui fios com diâmetros de 0,5, 0,63, 0,8, 1,0 e 1,25 mm, e é empregado em uma amostra de 50 mm, as únicas sensibilidades possíveis que podem ser registradas são 1,0%, 1,26%, 1,6%, 2,0% e 2,5%. Mesmo que uma tabela de valores atingíveis indique que 1,5% de sensibilidade é alcançável, esse pode ser o verdadeiro valor limite, baseado em uma curva teórica e suavizada, que seria obtido se houvesse um elemento de IQI perfeitamente alinhado a essa sensibilidade.

No entanto, neste cenário específico, o profissional responsável pela leitura do filme seria obrigado a registrar 1,6% como a melhor sensibilidade atingível, pois é o valor mais próximo e o único observável com os elementos disponíveis no IQI.

Assim, na Figura 3-42, a curva suave ilustra as melhores sensibilidades teoricamente atingíveis para o IQI de furo perfurado em diferentes espessuras de aço. No entanto, a linha em dente de serra representa os melhores valores efetivamente alcançáveis com os tamanhos de IQI padrão disponíveis. Isso destaca que, na prática, a sensibilidade é limitada pelos elementos discretos do IQI, não por uma progressão contínua.

Figura 3-42- Valores de sensibilidade com um IQI degrau/buraco.



Fonte: Halmshaw, 1995

Experimentos revelaram que é possível alcançar praticamente os mesmos valores de sensibilidade que observamos na Tabela 3-5 para raios-X e aço, mesmo ao testar amostras de alumínio e ligas de alumínio de espessuras idênticas. A chave para isso está em utilizar as quilovoltagens (kV) adequadas para cada tipo de material, garantindo assim resultados comparáveis.

Tabela 3-7- Valores de sensibilidade IQI atingíveis em aço

| Espessura da amostra (mm) | Quilovoltagem da fonte | Fio IQI | | Etapa / Furo IQI | | Cunha de degrau (%) | Fio duplo x (mm) |
|---------------------------|------------------------|---------|---------------|------------------|-----------------------|---------------------|------------------|
| | | (%) | diâmetro (mm) | (%) | Diâmetro do furo (mm) | | |
| Raios-X | | | | | | | |
| 3 | 80 | 1.6 | 0.05 | - | - | - | - |
| 6 | 120 | 1.1 | 0.063 | 2.7 | | - | - |
| 12 | 150 | 1.0 | 0.125 | 2.5 | | - | <0.10 |

| | | | | | | | |
|---------------|--------|------|-------|-----|------|------|------|
| 25 | 220 | 1.0 | 0.25 | 2.0 | | <0.5 | 0.16 |
| 40 | 280 | 0.8 | 0.32 | 1.6 | | 0.5 | 0.2 |
| 50 | 300 | 0.8 | 0.40 | 1.6 | | 0.7 | 0.3 |
| 75 | 400 | 0.7 | 0.50 | 1.3 | | 0.8 | 0.4 |
| 100 | 1MV | 0.6 | 0.63 | 1.6 | | 0.5 | 0.4 |
| 200 | 8MV | 0.5 | 1.00 | - | - | 0.4 | 0.6 |
| Raios gama | | | | | | | |
| 3 | Yb-169 | 2.7 | 0.08 | - | - | - | - |
| 6 | Yb-169 | 2.0 | 0.125 | 5.0 | 0.32 | - | - |
| 6 | Ir-192 | 2.6 | 0.16 | 6.6 | 0.4 | - | - |
| 12 | Yb-169 | 1.3 | 0.16 | 3.3 | 0.4 | - | - |
| 12 | Ir-192 | 1.7 | 0.20 | 4.1 | 0.5 | - | 0.10 |
| 25 | Ir-192 | 1.3 | 0.32 | 2.6 | 0.63 | 0.6 | 0.10 |
| 40 | Ir-192 | 1.0 | 0.40 | 2.0 | 0.8 | 0.55 | 0.13 |
| 50 | Ir-192 | 1.0 | 0.50 | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.20 |
| 75 | Co-60 | 0.85 | 0.63 | 1.7 | 1.25 | 0.6 | 0.25 |
| 100 | Co-60 | 0.8 | 0.80 | 1.6 | 1.6 | - | 0.40 |
| 150 | Co-60 | 0.8 | 1.25 | 1.7 | 2.5 | - | 0.50 |

Fonte: Halmshaw, 1995

Cálculo de sensibilidade de detalhe

Se Δx é a mudança de espessura mínima que pode ser detectada, ΔD deve ser a diferença de densidade mínima detectável a olho nu na radiografia, e $\Delta x / x$ pode ser expresso como uma sensibilidade de espessura percentual S :

$$S = \frac{\Delta x}{x} 100 = \frac{2.3\Delta D}{\mu G_D x} \left(1 + \frac{I_S}{I_D}\right) 100 \quad (17)$$

que pode ser escrito como:

$$S = \frac{A}{x} 100 \quad (18)$$

onde:

$$A = \frac{2.3\Delta D}{\mu G_D} \left(1 + \frac{I_S}{I_D}\right) \quad (19)$$

Essa equação tem uma ampla evidência experimental que comprova sua precisão. O valor de ΔD , que representa a menor diferença de densidade detectável a olho nu na radiografia, geralmente varia entre 0,006 e 0,01, a depender das condições de visualização. É importante notar que essa fórmula não se limita apenas à espessura; ela pode ser estendida para calcular o tamanho mínimo de furos ou arames detectáveis em uma radiografia, e até mesmo para identificar falhas como trincas artificiais.

Os parâmetros adicionais mais desafiadores que precisam ser incorporados são:

- A falta total de nitidez radiográfica na técnica de ultrassom (UT).
- O desempenho do olho humano ao tentar visualizar imagens de contraste muito baixo, que ainda por cima apresentam diferentes formas e tamanhos.

Podemos formular um método para calcular a sensibilidade ao detalhe a partir da equação 25. Para isso, vamos considerar uma cavidade extremamente pequena, com largura e profundidade " b ", dentro de uma amostra de espessura total " t ". O excesso de radiação que consegue atravessar essa cavidade é então descrito pela equação:

$$I_0 W [\exp\{-\mu(t - b)\} - \exp(-\mu t)] \quad (20)$$

que se aproxima de

$$I_0 \mu (Wb) \exp(-\mu t) \quad (21)$$

Assim, para um pequeno fio de raio r , a mudança na quantidade de radiação direta que atinge o filme por unidade de comprimento de fio é

$$\pi r^2 \mu I_D \quad (29)$$

Na presença de falta de nitidez da imagem, o que acontece é que a imagem de um fio aparece ampliada e, ao mesmo tempo, seu contraste é reduzido, e a largura da imagem no filme é

$$(2r = U_T) \quad (23)$$

onde U_T é a falta de nitidez total efetiva. Como a característica de um filme de raios-X pode ser expressa por

$$D = G_D \log_{10}(I_S + I_D)T + \text{constant} \quad (24)$$

onde T é a exposição, então

$$\Delta D = 0.43 G_D \frac{\Delta I_D}{I_S + I_D} \quad (25)$$

Se então for assumido que a intensidade da radiação através da imagem do fio é constante, a mudança na intensidade da radiação na imagem será

$$\pi r^2 \mu I_D \left(\frac{1}{2r + U_T} \right) = \Delta I_D = \frac{\Delta D (I_S + I_D)}{0.43 G_D} \quad (26)$$

Uma vez que a densidade do filme na imagem não é uniforme, foi sugerido que a diferença de densidade mínima discernível normal ΔD não será a mesma que para uma etapa de densidade simples, e um 'fator de forma' deve ser introduzido, ($F \Delta D$) em vez de ΔD . Para fios pequenos $F = 0,6$ e para fios maiores $F = 1$. A equação resultante é

$$\frac{r^2}{2r + U} = \frac{2.3 F \Delta D \left(1 + \frac{I_S}{I_D} \right)}{G_D \mu \pi} \quad (27)$$

A partir desta equação, r pode ser avaliado e a sensibilidade do fio é

$$\left(\frac{2r}{t}100\right)(\%) \quad (28)$$

Uma equação semelhante pode ser desenvolvida para a sensibilidade IQI da etapa / furo e se o diâmetro do furo for igual à espessura da etapa h, então

$$\frac{h^2}{(h+2U_T)^2} = F \frac{2.3\Delta D}{\mu G_D} \left(1 + \frac{I_S}{I_D}\right) \quad (29)$$

Embora essas equações devam ter limitações, pois não levam em consideração a granulação do filme, elas fornecem uma boa visão dos fatores que afetam a sensibilidade do IQI. Os valores calculados a partir dessas equações são mostrados na Tabela 3-8 e podem ser comparados com os valores experimentais dados na Tabela 3-7.

Tabela 3-8- Valores calculados de sensibilidade IQI

| <i>Espessura do aço (mm)</i> | <i>Sensibilidade calculada (%)</i> | | <i>Observações</i> |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| | <i>Fio</i> | <i>Passo / buraco</i> | |
| 3 | 1.6 | - | Raios-X de 60 kV |
| 6 | 0.9 | 2.3 | Raios-X de 100 kV |
| 12 | 1.0 | 1.7 | Raios-X de 150 kV |
| 12 | 1.7 | 3.4 | Raios gama Ir-192 |
| 25 | 0.8 | 1.5 | Raios-X de 220 kV |
| 25 | 1.1 | 2.1 | Raios gama Ir-192 |
| 50 | 0.6 | 1.6 | Raios-X de 300 kV |

| | | | |
|-----|------|-----|-------------------|
| 50 | 0.95 | 1.6 | Raios gama Ir-192 |
| 75 | 0.7 | 1.2 | Raios-X de 400 kV |
| 75 | 0.74 | 1.5 | Raios gama Co-60 |
| 100 | 0.6 | 1.3 | Raios-X de 1MV |
| 100 | 0.7 | 1.9 | Raios gama Co-60 |
| 150 | 0.55 | 1.6 | Raios-X de 5MV |

Fonte: Halmshaw, 1995

Na Tabela 3-8, pode-se ver que os valores de IQI calculados do fio concordam bem com o experimento, e isso possivelmente ocorre porque o fio tem vários milímetros de comprimento e, portanto, não é muito afetado pela granulação da imagem. Os valores de IQI de degrau / furo são um pouco mais erráticos e, em geral, os valores calculados são ligeiramente inferiores aos da experiência, indicando que a granulação tem mais influência em uma imagem circular pequena, como seria de se esperar. Além disso, com imagens muito pequenas, o valor a ser obtido para ΔD é menos certo e provavelmente varia ligeiramente com o tamanho da imagem; em uma amostra de 6 mm, um orifício de 2% tem um diâmetro de apenas 0,12 mm.

Determinação da profundidade do defeito

A maioria dos defeitos detectados por radiografia são tridimensionais. Para avaliar a gravidade de um defeito, é ideal determinar suas três dimensões e sua natureza. Geralmente, a radiografia permite identificar a natureza do defeito e medir facilmente seu comprimento e largura paralelos ao plano do filme. No entanto, a dimensão da espessura (altura) é mais difícil de precisar.

A profundidade de um defeito em relação à superfície pode ser estabelecida por meio de métodos estereométricos. Embora uma varredura densitométrica na imagem possa fornecer alguma informação sobre a dimensão da espessura de uma falha, essa técnica não é eficaz para defeitos estreitos, como rachaduras.

Uma técnica alternativa foi proposta por Yokota e Ishii (1978), a essência de seu método é fazer duas exposições em ângulos diferentes (tipicamente $\pm 10^\circ$) e medir a largura das duas imagens de fissura. A partir dessas duas medidas, a altura da fissura pode ser facilmente calculada, independentemente de a fissura ser normal à superfície ou em ângulo. Se os dois ângulos do feixe de raios-X são $\pm \theta^\circ$, e as imagens de fissura têm larguras de I_1 e I_2 , a altura da fissura h é

$$h = \frac{1}{2}(I_1 + I_2)\cot\theta \quad (30)$$

Testes com diferentes métodos de medição de imagem indicaram que um projetor de filme de alta potência, utilizando ampliação linear de 15 a 20 vezes e boa óptica, proporciona os resultados mais consistentes. Com essa abordagem, é possível medir larguras de imagem de fissuras entre 0,2 e 0,8 mm com uma precisão estimada de $\pm 10\%$, um valor similar ao relatado por pesquisadores japoneses.

Yokota e Ishii (1978) sugeriram manter a falta de nitidez total abaixo de 0,2 mm, preferindo posicionar a rachadura no lado do filme da amostra, e recomendaram o uso de filmes de grão extrafino. Eles observaram que a altura de fissuras naturais era consistentemente subestimada em aproximadamente 25%, devido ao estreitamento da borda de propagação da fissura, com larguras de abertura variando de 0,06 a 0,2 mm.

Em contraste, Morikawa e Koyama (1978), utilizando raios-X de alta energia em placas de 60 a 100 mm de espessura, reportaram erros de no máximo $\pm 4\%$ na determinação da altura da fissura.

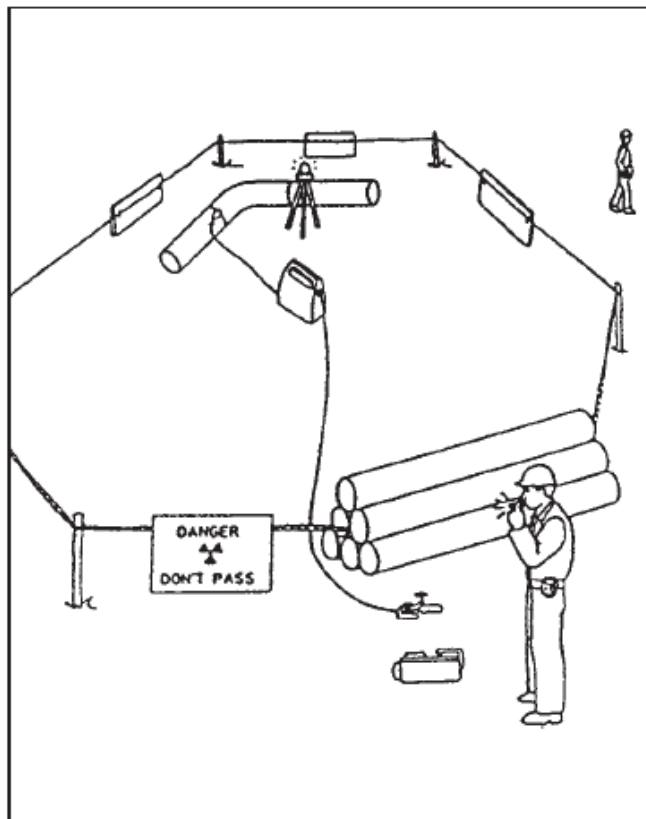
Essas propostas são diretas e dependem crucialmente da capacidade de medir com precisão a largura da imagem de um defeito quando a radiografia é feita intencionalmente em ângulo. Experimentos confirmam que isso é possível, embora seja uma tarefa desafiadora, mesmo ao analisar uma imagem de rachadura.

3.6 Adequação do Laboratório para Operar Betatron de 7,5 MeV para Ensaios Radiográficos de Estruturas de Concreto Armado

Do ponto de vista da proteção radiológica é de fundamental importância os procedimentos de balizamento. O esquema básico de balizamento é mostrado na

Figura 3-43. Para o presente trabalho, foi realizado o monitoramento do medidor Geiger in-loco.

Figura 3-43- Arranjo típico de balizamento para realizar radiografia no campo.

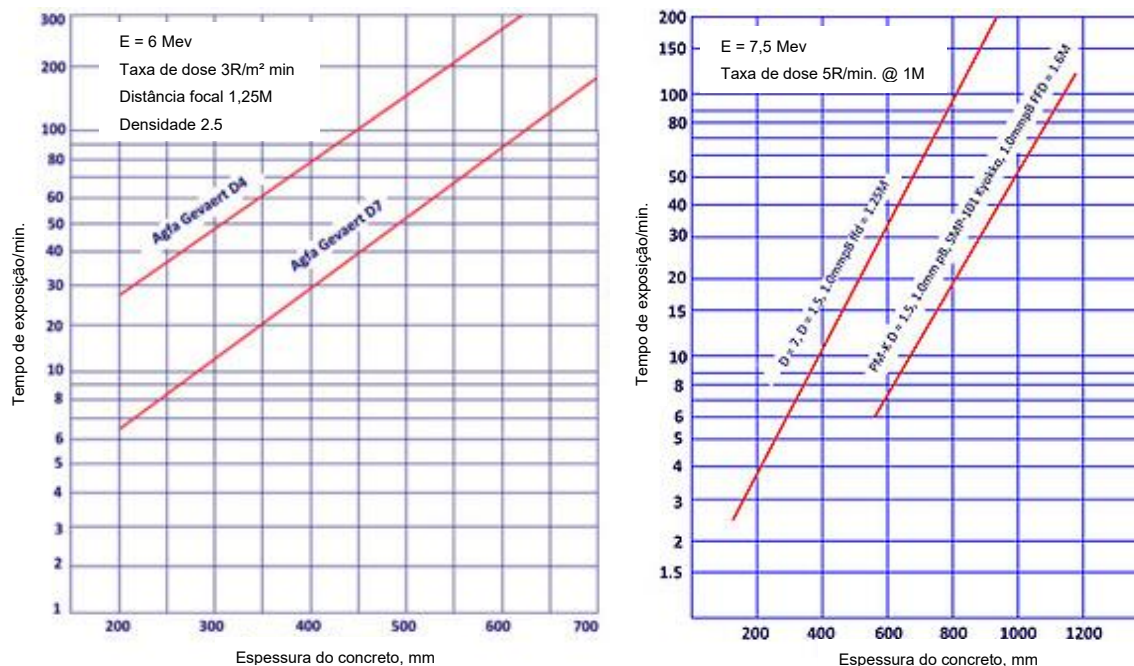


Fonte: IAEA- International Atomic Energy Agency.

O objeto a ser radiografado deverá estar localizado a uma distância de 1 metro do betatron. O operador deverá ficar a uma distância do arranjo, num esquema semelhante ao da Figura 3-43 após o levantamento radiométrico.

O produto almejado será o procedimento para obtenção de uma carta de “Tempo de Exposição” de raios-X de alta energia de betatron e uso do Imaging Plate (IP) em função da espessura do concreto da base da torre de LT autoportante. Por exemplo, carta de exposição almejada seria similar como mostrada na Figura 300 para concreto com espessura de até aproximadamente 120 cm quando filmes de raios-X D7 da Agfa e PM-X da Kodak são utilizados com o betatron operado com 7,5 MeV.

Gráfico 3-6- Exemplo de carta de exposição com betatron operando a 6,0 MeV e 7,5 MeV. Tempo de exposição em função a espessura, para caso de filmes de raios-X convencional da Agfa D7, D4 e Kodak PM-X para obter imagens radiográficas de concreto com qualidade.



Fonte: JME Ltd.

Sabe-se que o tempo de exposição apropriado é um processo de tentativas e erros devido ao envolvimento de vários parâmetros de radiografia tais como são vistos na Tabela 3-9.

Tabela 3-9- Parâmetros envolvidos na determinação das condições de tempo de exposição.

| Reduz ← | Tempo de Exposição | → Aumento |
|---------|------------------------------|-----------|
| Fina | Espessura | Espessa |
| Baixa | Densidade específica | Alta |
| Alta | Tensão/Energia | Baixa |
| Menor | Distância entre Foco e Filme | Maior |
| Alta | Corrente do tubo de raios-X | baixa |

Em princípio, o tempo de exposição para Imaging Plate, devido a sua alta sensibilidade em função do filme convencional mencionado acima, deve ser em torno de 100 a 1000 vezes menor, o qual deverá ser confirmado em testes no laboratório e no campo.

Para realização dos ensaios laboratoriais e no campo com sistema de radiografia de alta energia é preciso um plano de proteção radiológica que atenda os normativos da CNEN.

Tendo em vista a inexistência de um laboratório no estado de Pernambuco que permitisse a realização de ensaios para definição das condições ótimas para obtenção de imagens com a fonte de raios-X com o Betatron, foi feita uma adequação no bunker do CRCN – Centro Regional de Ciências Nucleares com limitação de energia de 6,0 MeV.

O cálculo da blindagem contém as especificações de distância, fatores de ocupação das salas vizinhas, tempo máximo de irradiação e demais parâmetros relevantes à proteção radiológica. O Plano Geral e o cálculo de blindagem foram aprovados pelo supervisor de proteção radiológica e pelo Diretor do CRCN/NE.

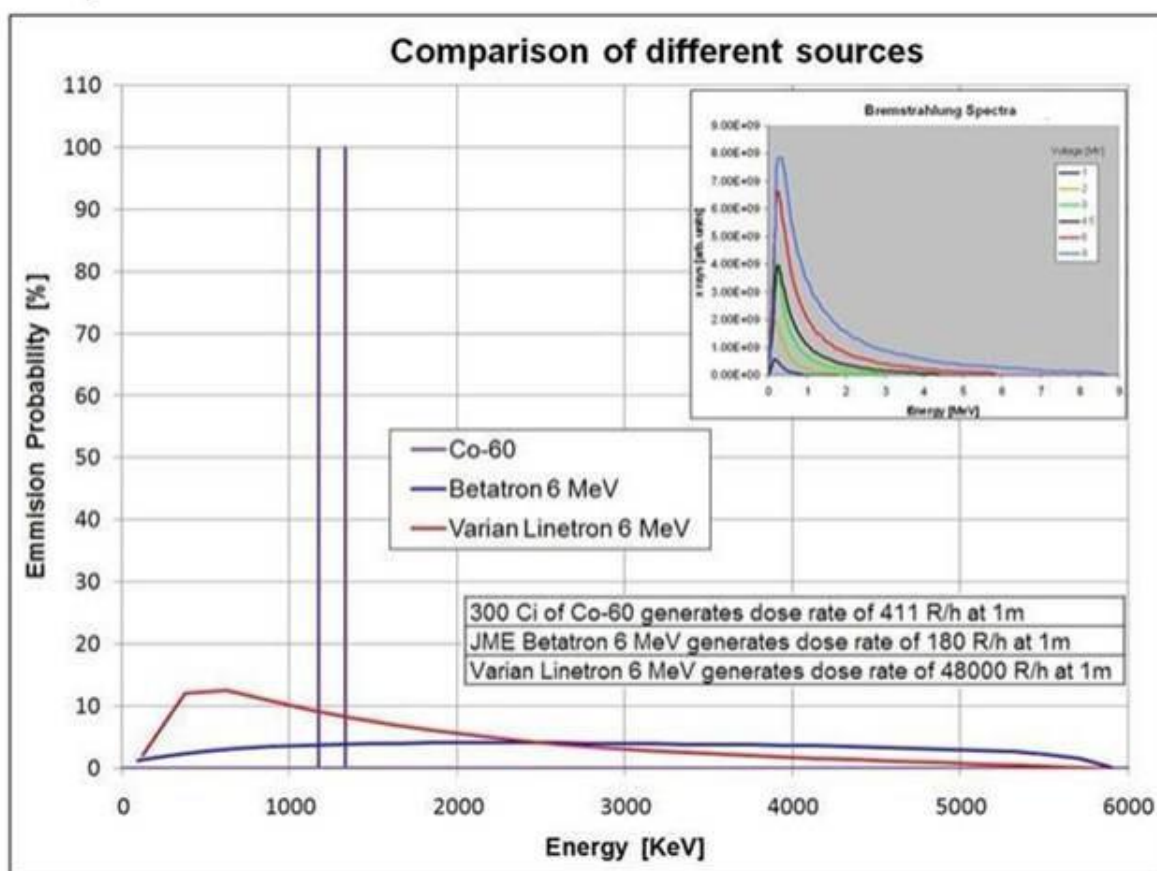
Capítulo 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Estudo para especificação do gerador de emissão de radiação de alta energia

O betatron é um acelerador por indução circular utilizado para a aceleração de elétrons. A palavra betatron deriva do fato de que os elétrons de alta energia são, frequentemente, chamados de partículas beta.

Gráfico 4-1- Espectro do feixe monocromático de betatron.



Fonte: Stoev (2014).

O betatron produz radiografias de alto contraste, sensibilidade e resolução, proporcionando um substituto ideal para isótopos (tais como o cobalto-60), que são mais caros e dão uma qualidade inferior. O betatron portátil é um acelerador de elétrons, compacto-circular, que produz um feixe de raios-X de alta energia direcional. Betatrons de tamanho reduzido são utilizados no controle radiográfico e de materiais de qualidade de produtos sob condições não estacionárias, tais como a construção civil.

Uma das suas principais vantagens é o padrão mais estreito da direção do feixe, o que resulta num perigo de radiação nas operações sob condições não estacionárias. O betatron dá boa nitidez da imagem devido ao pequeno tamanho da mancha. É fácil transportar, operar e manter, além de garantir um baixo volume de defeitos nas imagens de raios-X graças ao sistema de dosimetria remota. O conjunto que constitui a fonte de raios-X Betatron é composta de (i) acelerador de partículas; (ii) conversor de potência e (iii) painel de controle.

Figura 4-1- Equipamentos que compõem o betatron e uma tabela de especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.



Technical Specifications

| | PXB 6 | PXB 7.5 |
|-------------------------------|----------------------|------------------|
| X-ray output energy selector | 2 to 6 MeV | 2 to 7.5 MeV |
| Dose rate at 1m (air) | 3R per minute | 5R per minute |
| Focal Spot Size | 0.2 x 1.0 mm | 0.3 x 1.6 mm |
| Duty Cycle at 20°C (per hour) | 100% | 75% |
| Radiation beam spread angle | 26 degrees | 22 degrees |
| Radiographic sensitivity | Down to 0.5% | Typically 1% |
| AC power input | 110/240V 50/60Hz | 115/220V 50/60Hz |
| Dimensions and weight | | |
| Accelerator | 60 x 40 x 23 cm 90kg | 70 x 43 x 35 cm |
| Power converter | 59 x 36 x 36 cm 60kg | 56 x 46 x 38 cm |
| Control panel | 36 x 32 x 19 cm 7kg | 20 x 13 x 4 cm |
| Total system weight | 190 kg | 210 kg |

Technical specification may change in accordance with our policy of continuous product development

O estudo foi feito e envolveu contato com fornecedores e pesquisa relacionada a filmes de potenciais qualidades, contatos com outros pesquisadores, participação em congressos no sentido de verificar as novas aplicações na área.

4.2 Especificação e aquisição de um sistema completo de kit de coleta digital de imagens radiográficas.

Na busca por um sistema de radiografia computadorizada de alta resolução, em julho de 2007, o coordenador do projeto, prof. Armando Shinohara, esteve a trabalho no BAM – *Federal Institute for Materials and Testing*, Berlin, Alemanha, para conduzir experimentos de radiografia computadorizada no Laboratório coordenado pelo Dr. Uwe Zscherpel, eminente cientista na área de radiografia computadorizada.

Os materiais levados, para o referido laboratório, para ensaios de radiografia computadorizada, e micro-tomografia computadorizado eram: (i) isolador de compósito com defeitos, (ii) tubos de água com ataque de corrosão e (iii) material compósito Glare rebitado com ensaios de fadiga conduzidos na USP, São Carlos-SP.

Nesta ocasião, o coordenador teve a oportunidade de conhecer o novo sistema de radiografia computadorizada fabricado pela empresa alemã, Dürr, modelo NDT-HD35, considerado na época o sistema de radiografia computadorizada de maior resolução do mundo, e um sistema completo para operação no campo está estimado em torno de €80 mil euros. Atualmente, este sistema continua sendo o de maior resolução, porém tem o inconveniente de manipulação manual do sensor, o *Imaging Plate* e isto pode causar danos na superfície do filme, degradando a qualidade da imagem, principalmente quando se tratar de ensaios em ambientes reais.

Atualmente, dois outros sistemas, de fabricação da Kodak e da Fujifilm foram analisados para aquisição. O sistema da Fujifilm foi discutido pelo coordenador do projeto intensamente com a fabricante japonês na ocasião da estada no Japão, em novembro de 2009, em função da participação no congresso na área de ensaios não destrutivos – APCNDT-2009, Yokohama, Japão.

Figura 4-2- Sistema de radiografia computadorizada da Dürr HD-CR 35 NDT.



Esta etapa está em consonância com as buscas por um equipamento de melhor qualidade e de menor custo.

4.3 Adequação do Laboratório

Foi realizado a adequação do laboratório do CRCN para suportar uma energia de 7,5 MeV, (o nível de energia do CRCN estava limitado a 6 MeV). Com isso, foi adquirido 3,6 toneladas de chumbo conforme Figura 4-3 e sendo utilizada para ensaios.

Figura 4-3- Tijolos de chumbo para blindagem em caixas. No total foram entregues 8 caixas.



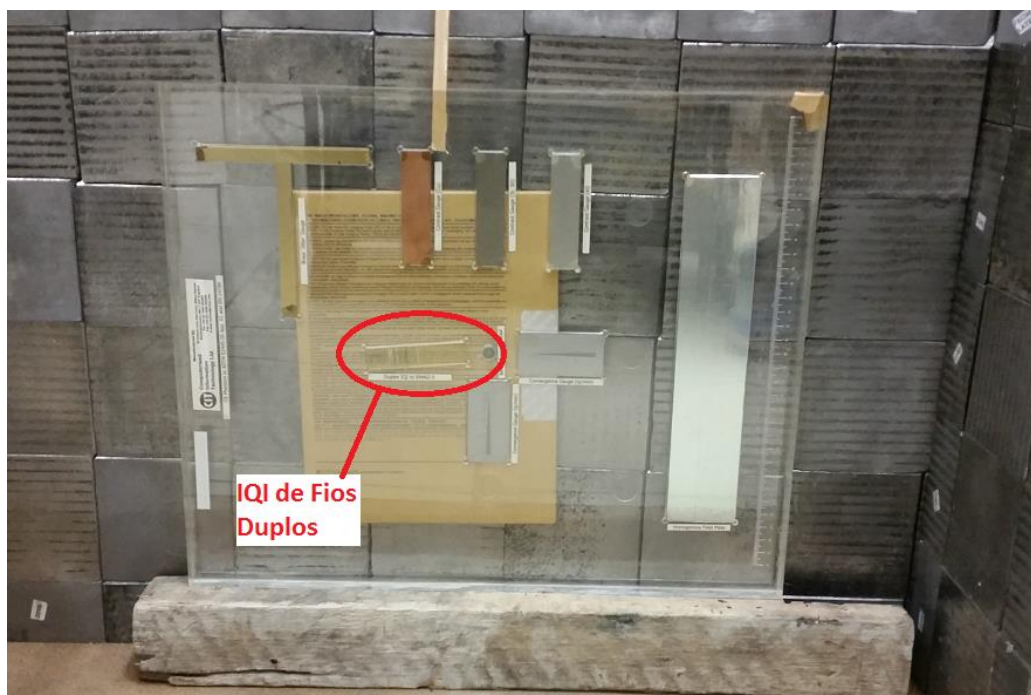
Figura 4-4- Parte dos tijolos de chumbo montados na forma de parede para realizar os ensaios no CRCN.



4.4 Avaliação da Qualidade de Imagem Radiográfica com Raios-X de alta Energia Utilizando IQI de Fio-duplo do Sistema Betatron e Imaging Plate

Na imagem abaixo tem-se um fantoma com vários IQI's diferentes, entre eles o IQI duplex em destaque, que foi utilizado para avaliar o resultado da qualidade no sistema de alta energia.

Figura 4-5- Fantomas com vários IQI's.



Filtros físicos com chapa de cobre de 0,89 mm de espessura e uma chapa de chumbo com 1 mm de espessura foram colocadas na frente do fantoma, entre a fonte e o fantom.

4.5 Arranjo dos Testes Radiográficos do Concreto sem Reforço com Espessura de 200 mm a 1500 mm para Determinação de Parâmetros Radiográficos com Raios X de Alta Energia para avaliar o poder de penetração.

Para determinar parâmetros radiográficos para inspecionar a integridade estrutural de ferragens de aço no concreto armado utilizados em linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão, inicialmente, blocos de concreto sem reforço de 500 mm de comprimento por 250 mm de diâmetro, no total de 1500 mm de comprimento foram testados com raios-X de alta energia de betatron de 2,5 MeV até 7,5 MeV.

Foi realizada uma adequação no bunker do CRCN – Centro Regional de Ciências Nucleares com limitação de energia de 6,0 MeV para os ensaios com energia utilizando 7,5 MeV.

As Figuras 4-6 a 4-8 mostram parte do sistema de radiografia digital do betatron, bem como o esquema para realização dos testes.

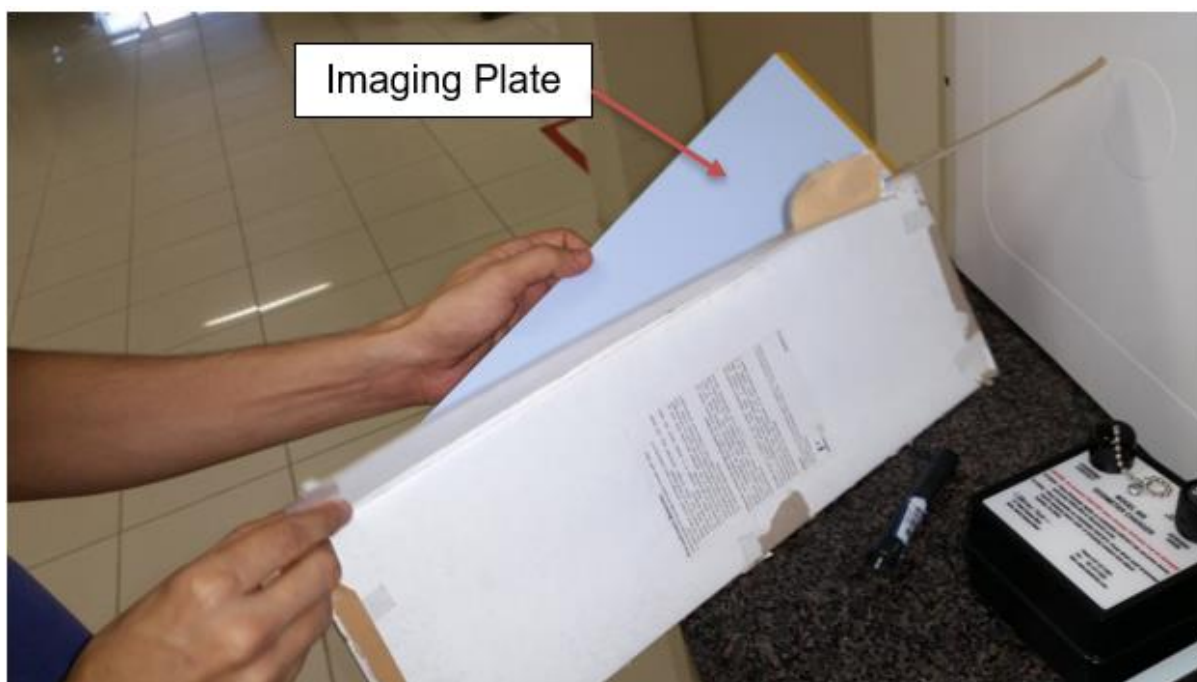
Figura 4-6- Montagem do equipamento.



Figura 4-7- Leitor do filme radiográfico Imaging Plate.

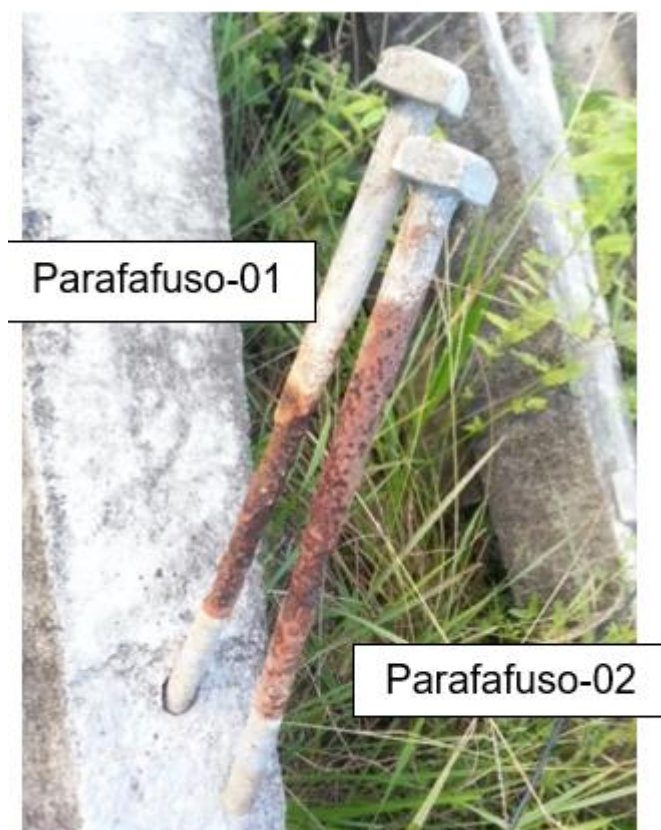


Figura 4-8- Filmes radiográficos de alta resolução Imaging Plate.



A Figura 4-9 mostra os parafusos com perda de massa utilizados nos ensaios.

Figura 4-9- Parafusos com corrosão utilizados para os ensaios.

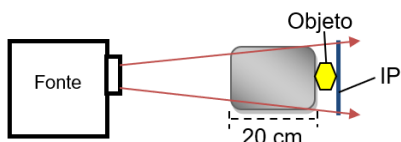


O Leitor de IP (imaging plate) utilizado foi o modelo HD-CR 35 NDT da Durr com resolução de 40 μm de resolução e o IP Perkin Elmer 12,5 cm x 43 cm foi super-resolution (azul). Os parâmetros de irradiação utilizados estão descritos na tabela 5-3, com distância entre a fonte e o filme de 1 metro.

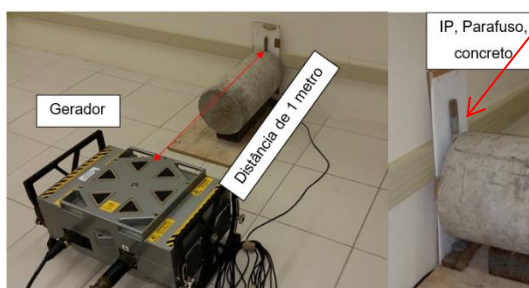
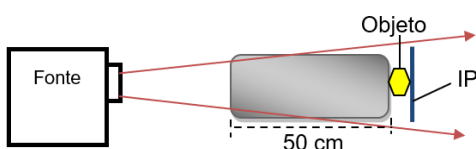
Avaliação da capacidade de transmissão de raios-X em concreto com espessura de 200 mm até 1500 mm. Seguem abaixo os esquemas dos ensaios que foram realizados no laboratório:

Ensaio 1: Objeto a ser radiografado junto ao IP:

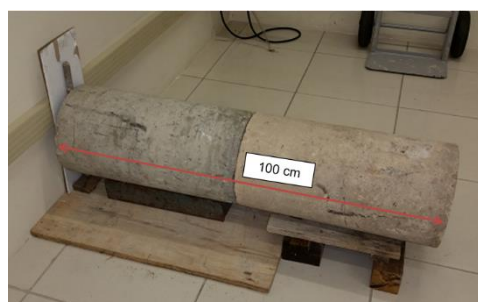
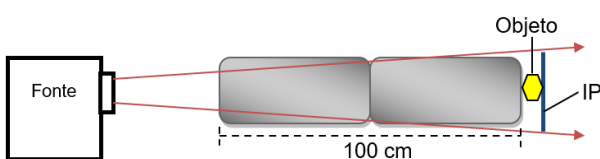
- Concreto com 20 cm de espessura



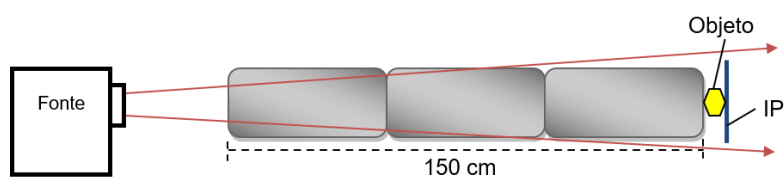
- Concreto com 50 cm de espessura



- Concreto com 100 cm de espessura

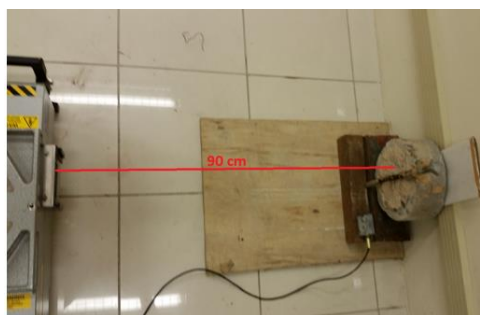
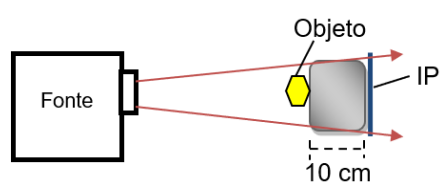


- Concreto com 150 cm de espessura

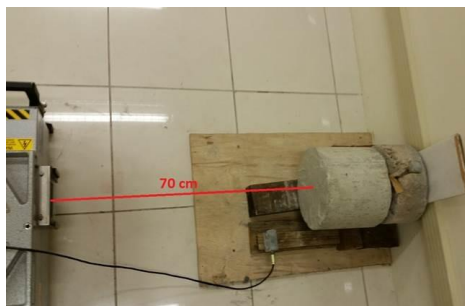
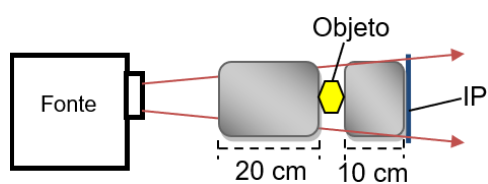


Ensaio 2: Objeto a ser radiografado afastado do IP:

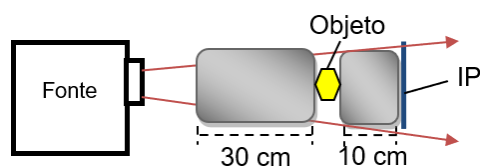
- Concreto com 10 cm de espessura



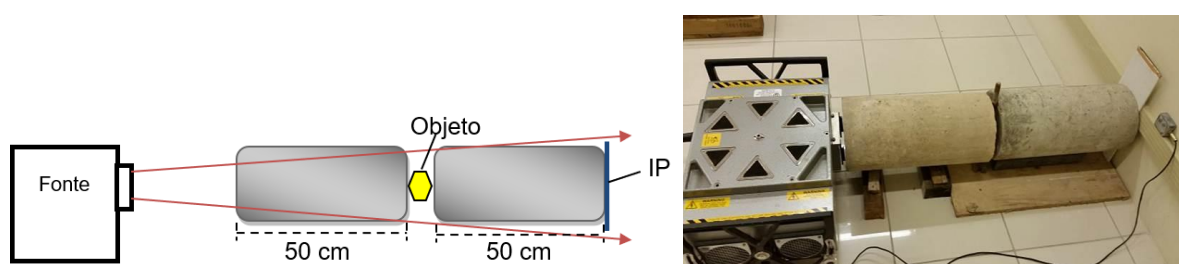
- Concreto com 20 cm e 10 cm de espessura



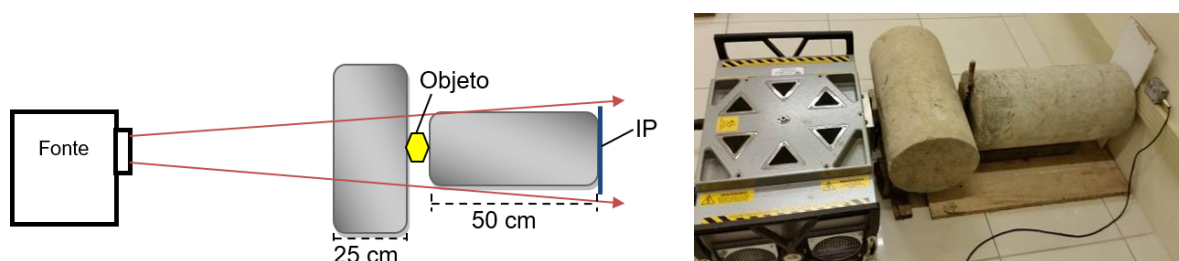
- Concreto com 30 cm e 10 cm de espessura



- Concreto com 50 cm e 50 cm de espessura

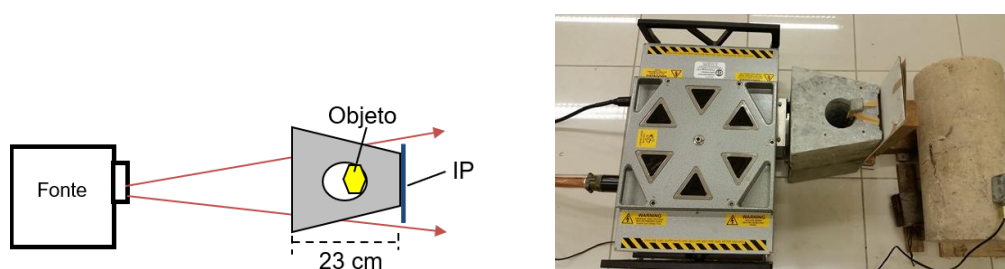


- Concreto com 25 cm e 50 cm de espessura

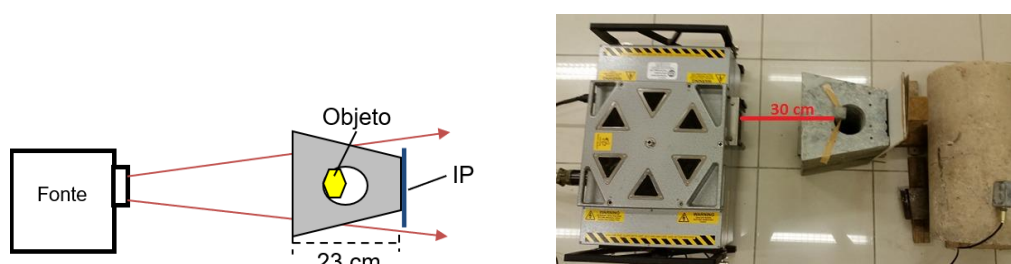


Ensaio 3: Objeto a ser radiografado no interior do concreto com cavidade vazia de 8 cm de diâmetro

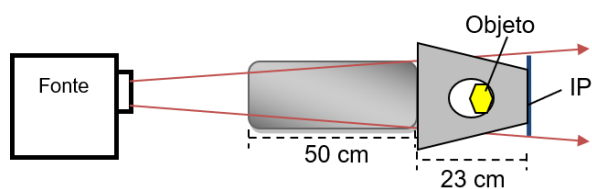
- Concreto de 23 cm com objeto no interior a 6 cm de distância do IP



- Concreto de 23 cm com objeto no interior a 14 cm de distância do IP

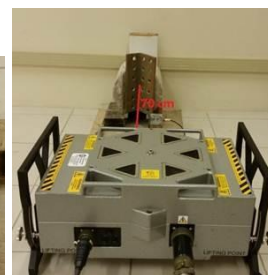
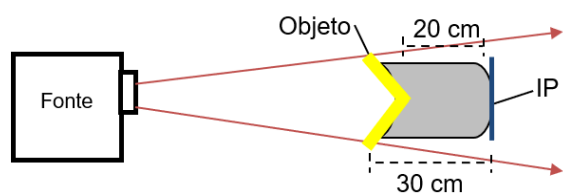


- Concreto com 50 cm de espessura mais concreto de 23 cm com objeto no interior a 6 cm de distância do IP

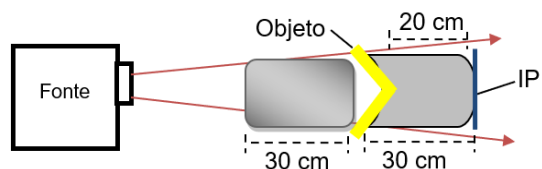


Ensaio 4: Objeto com furos a ser radiografado afastado do IP

- Concreto com 20 cm a 30 cm de espessura



- Concreto com 20 cm a 30 cm de espessura



4.6 Uso de Filtros Físicos de Cobre e Chumbo para Redução do Efeito do Espalhamento de Raios-X devido ao Efeito Compton Visando Imagem Radiográfica de Alta Qualidade

Desenvolvimento de procedimentos para obtenção de imagens radiográficas de estruturas de concreto armado com mínimo efeito de espalhamento de raios-X.

- ✓ Realização de ensaios sem filtros de espalhamento de raios-X;
- ✓ Realização de ensaios com filtros de cobre e chumbo para minimizar o espalhamento de raios-X sobre a qualidade de imagem.

Figura 4-10- Chapa de cobre de 0,89 mm de espessura.



Figura 4-11- Chapa de chumbo de 1 mm de espessura.



4.7 Processamento de Imagens Digitais com Softwares Comerciais e Dedicados para Realçar Regiões de Interesse (ROI)

As imagens foram processadas no software Isee! e utilizados filtros matemáticos para melhoramento de imagem realçando as regiões de interesse.

4.8 Testes Radiográficos com Raios-X de Alta Energia com Imaging Plate de Diferentes Fabricantes

Tabela 4-1- Imaging Plates utilizados.

| Características do Imaging Plate | FABRICANTE (País) | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| | Durr (Alemanha) | FujiFilm (Japão) | Perkin-Elmer (Estados Unidos) |
| Modelo | HDIP3543-108 | CR UR-1 | SR Super Resolution |
| Dimensão | 35 cm X 43 cm | 18 cm X 24 cm | 12,5 cm X 43 cm |

4.9 Preparação para Testes Radiográficos da Fundação de Concreto Armado de uma Torre Metálica Autoportante de Linha de Transmissão de 230 kV

Para determinar parâmetros radiográficos para radiografar estruturas de ferragens de aço nas fundações foi reproduzido, na UFPE, um protótipo da fundação em sapata da estrutura SG21d da linha Campina Grande II/Pau Ferro da CHESF. A reprodução de uma seção foi baseada no projeto da fundação em sapata fornecido pela CHESF.

A Figura 4-12 mostra o esquema do concreto armado de 20 MPa que foi reproduzido para realizar ensaios em laboratório do CRCN, visando obter parâmetros para realizar radiografia de alta qualidade no campo, dentro do objetivo do projeto: inspecionar a integridade do concreto armado, estado das ferragens de aço, presença de vazios. A secção lateral é na dimensão similar à que se encontra na linha de transmissão, mas a altura foi limitada a 55 cm. Visando reproduzir concreto de mesma performance, 20 Mpa, o concreto foi preparado de acordo com a seguinte composição e proporção: 50 kg de areia grossa, 228 kg de brita intermediária, 165 kg de areia, 82 kg de cimento e 45 kg de água.

Figura 4-12- Esquemas da fundação em sapata da linha de transmissão Campina Grande II/ Pau Ferro. A unidade de comprimento na figura esquemático da figura à direita é em cm.

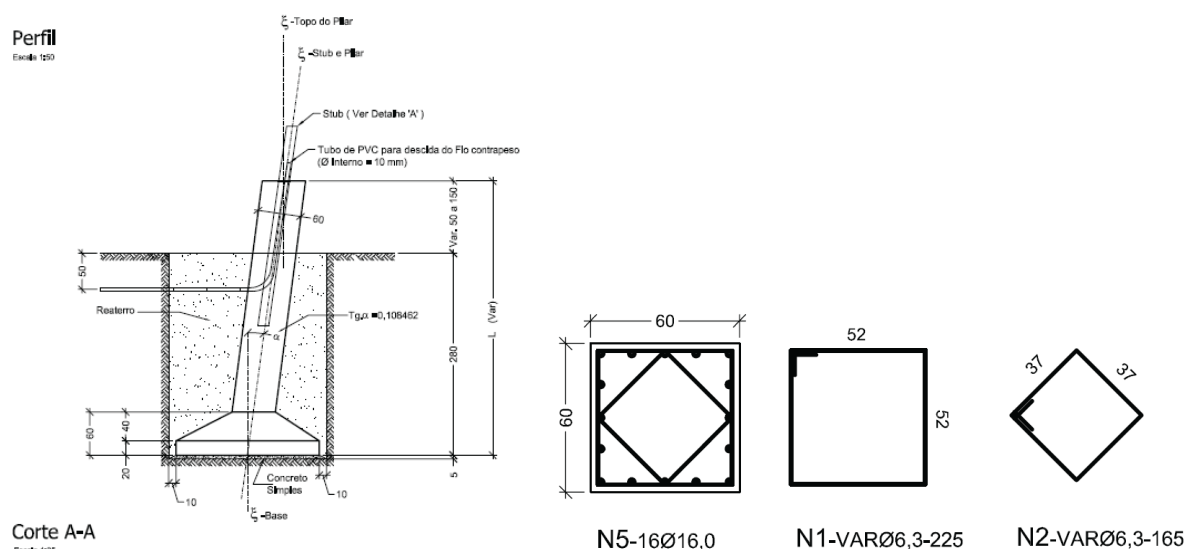


Figura 4-13- Caixa para concretar a armadura de aço.



As Figuras 4-14, 4-15 e 4-16 mostram os preparativos para concretar a estrutura de concreto armado. Na armadura de aço foram introduzidos defeitos de corrosão, simulando perda de massa.

Figura 4-14- Armadura de aço para ser concretado dentro da caixa.



Figura 4-15- Armadura de aço e no interior com cantoneira em “L” de abas iguais, de dimensão similar do “pé” da torre metálica autoportante, vazios (tubos) e defeitos (perda de massa) introduzidos na armadura para tentar visualizar através de radiografia de alta energia.



Figura 4-16- No Departamento de Engenharia Civil da UFPE para preparar o concreto e preenchimento da caixa de madeira com armadura.

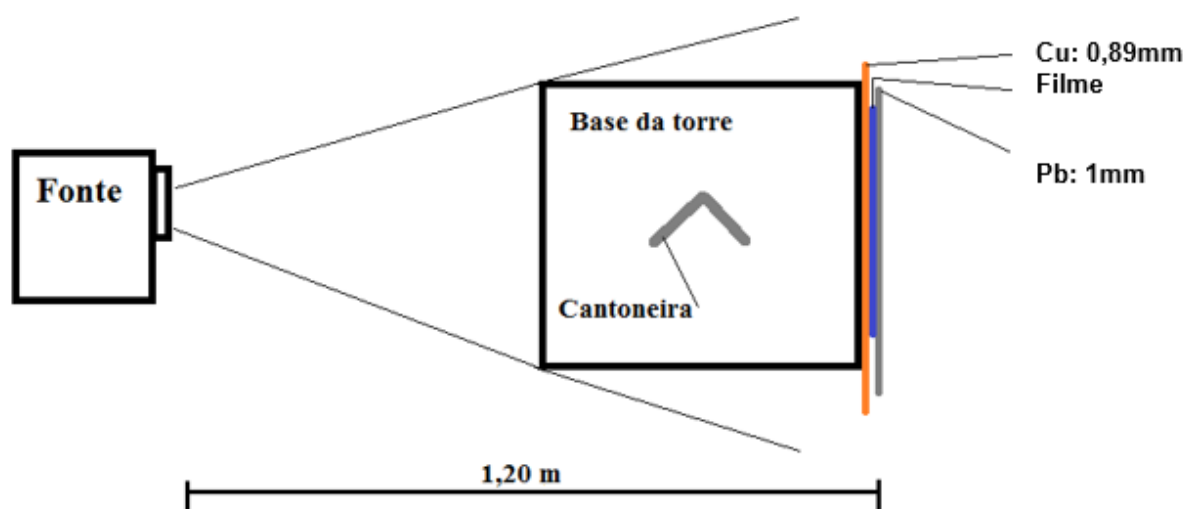


A base de concreto armado foi fabricada com o objetivo de simular uma base de concreto real de pé de torre. Para isso, além do concreto, foi inserido também as armaduras e uma **cantoneira (stub)** para simular o pé da torre. Foram inseridas também algumas falhas simuladas pelos canos. A cantoneira inserida é móvel, podendo ser retirada e colocada uma outra cantoneira corroída no lugar para podermos radiografar.

Figura 4-17- Arranjo experimental para radiografia concreto armado de uma fundação da torre metálica autoportante.



Figura 4-18- Esquema do ensaio radiográfico com raios-X de alta energia.



4.10 Preparação para testes Radiográficos dos Tirantes no Interior de uma Torre de Concreto de Linha de Transmissão de 500 kV

Foram realizados ensaios utilizando a extremidade do tirante de sustentação da cruzeta da estrutura HB-AR de 500 kV da Chesf, como mostra a imagem abaixo. Esta estrutura é sustentada por tirantes de aço de 22 mm.

Figura 4-19- Esquema de uma torre de concreto de linha de transmissão de 500 kV.

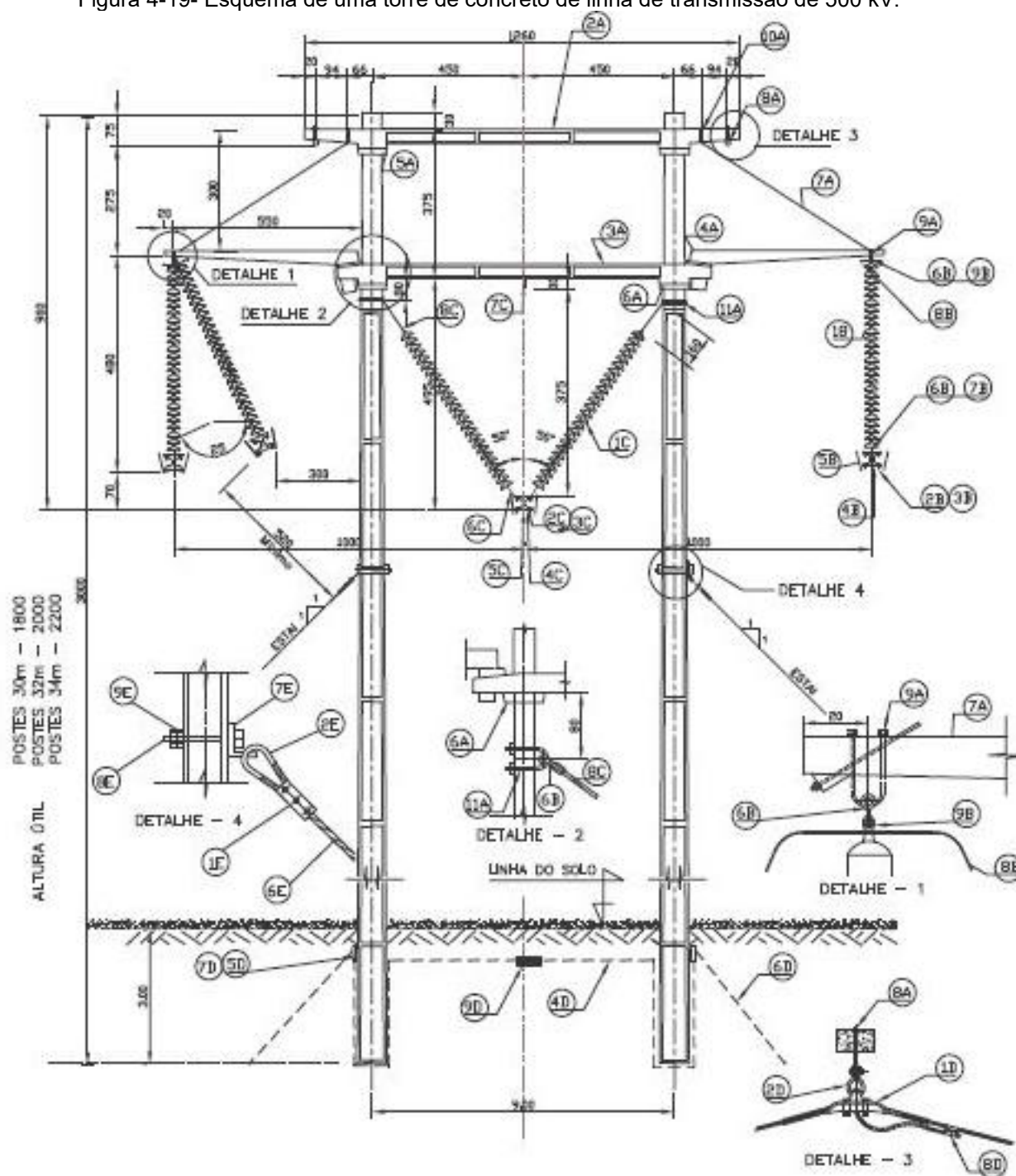
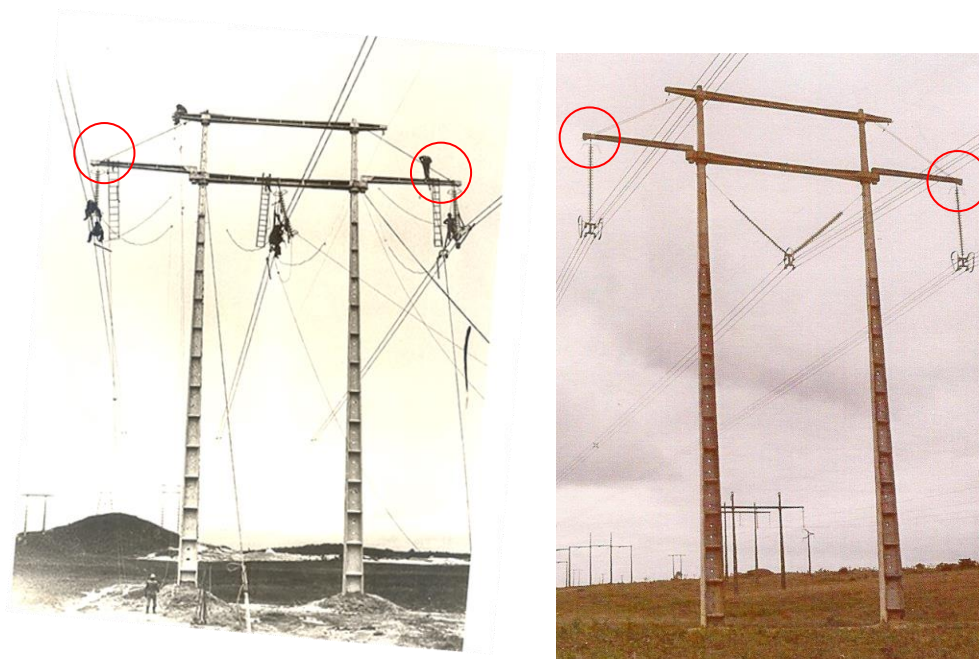


Figura 4-20- Construção da linha de transmissão de 500 kV no Nordeste e em operação. Os círculos mostram o local que possui os parafusos.



O esquema adotado para as radiografias é mostrado na Figura 4-21, e em seguida estão os esquemas utilizados para ensaios sem filtro físico, Figura 4-22 e com filtros físicos de cobre e chumbo.

Figura 4-21- Esquema adotado.



Figura 4-22- Esquema do ensaio sem filtro com 5 MeV, tempo de 10 min e distância fonte/filme de 1 metro.

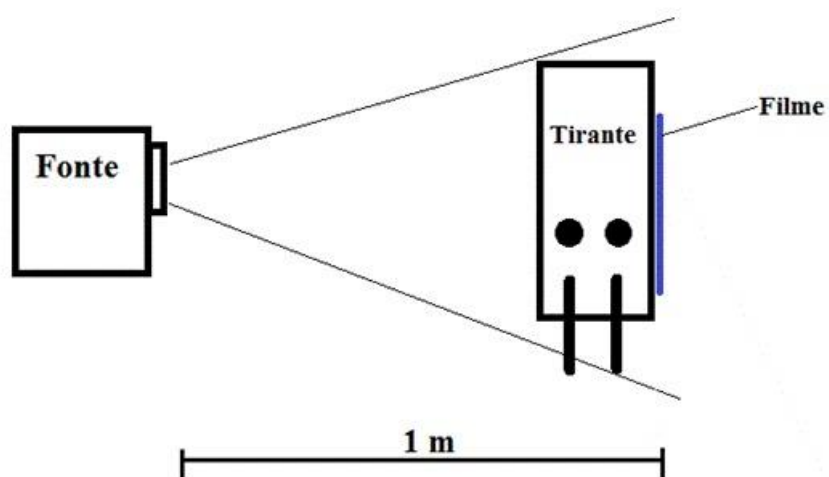


Figura 4-23- Esquema do ensaio com 5 MeV, tempo de 10 min e distância fonte/filme de 1 m e filtros de cobre de 0,89mm e de chumbo de 1mm.

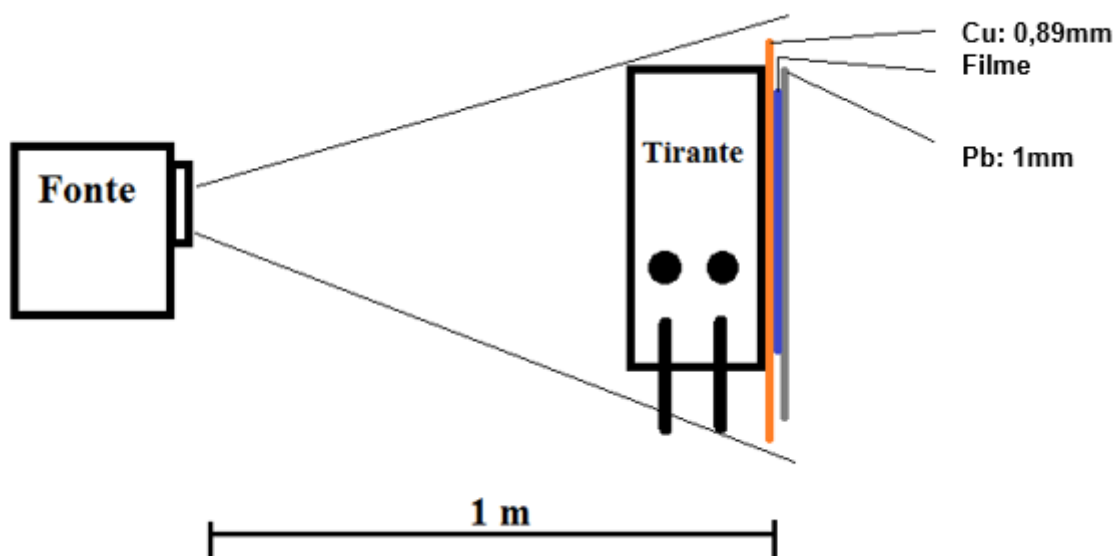


Figura 4-24- Fabricação da estrutura da cruzeta.



Figura 4-25- Parafuso corroído no lugar do tirante inclinado de sustentação da cruzeta.





Figura 4-26- Esquema adotado.



Figura 4-27- Posição do filme.



Também foram realizados ensaios utilizando um parafuso com alto grau de corrosão no lugar da barra de aço.

Figura 4-28- Esquema.



4.11 Locais de Testes em Campo para Validar os Parâmetros Radiográficos Obtidos em Testes Laboratoriais

Torre de 230kV da linha Campina Grande/Pau Ferro

O primeiro teste em campo com o sistema de radiografia digital de alta energia para radiografar ferragens de aço no interior da estrutura de concreto armado de secção quadrada de fundação de torre autoportante de secção de 70 cm foi realizado na torre de 230kV da linha Campina Grande II / Pau Ferro.

Figura 4-29- Vista geral da torre autoportante da linha de transmissão de 230 kV Campina Grande II / Pau Ferro, selecionada para realizar testes de radiografia computadorizada de alta energia utilizando o betatron.



Figura 4-30- Esquema da montagem do sistema radiográfico na base da torre.

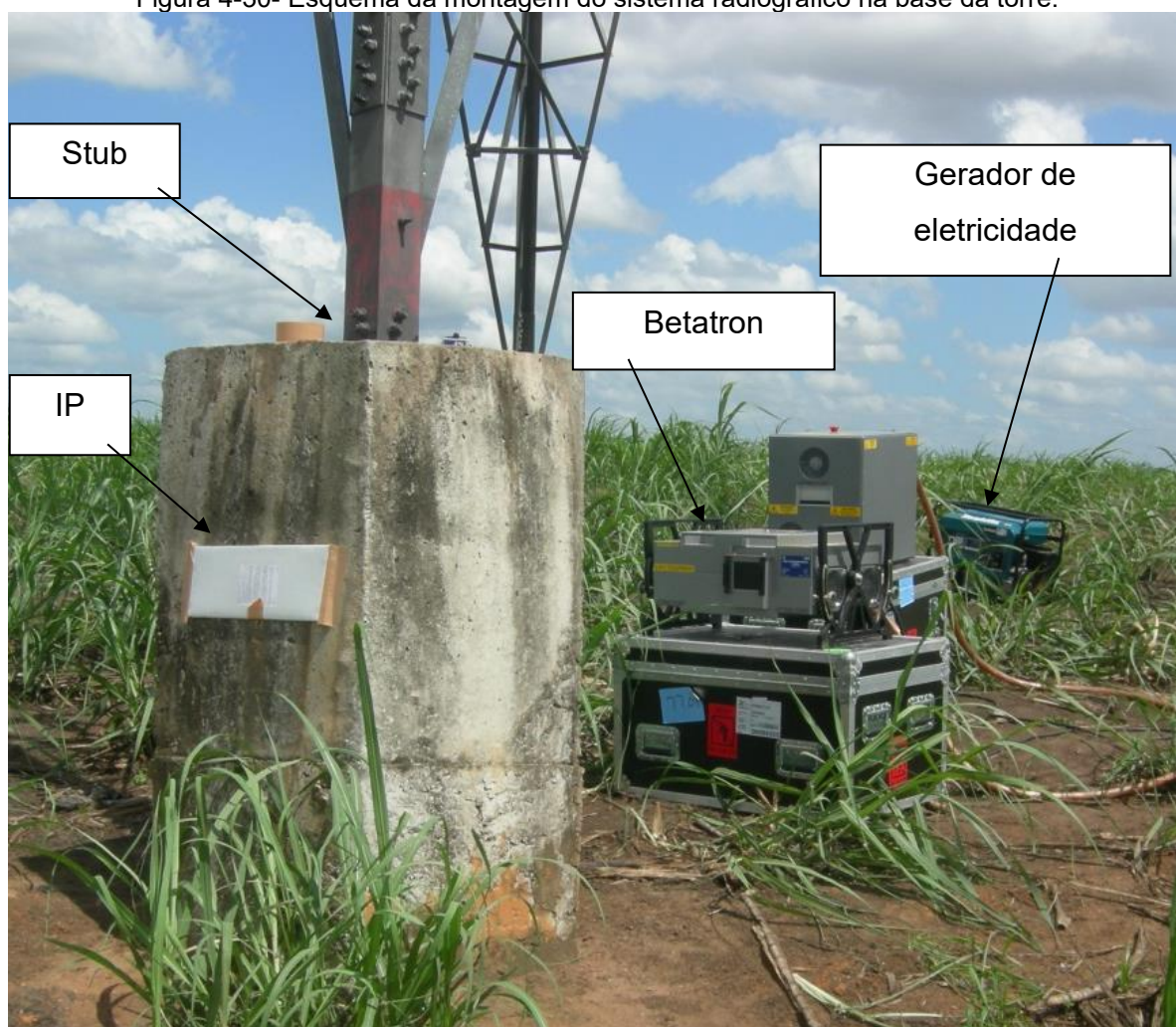
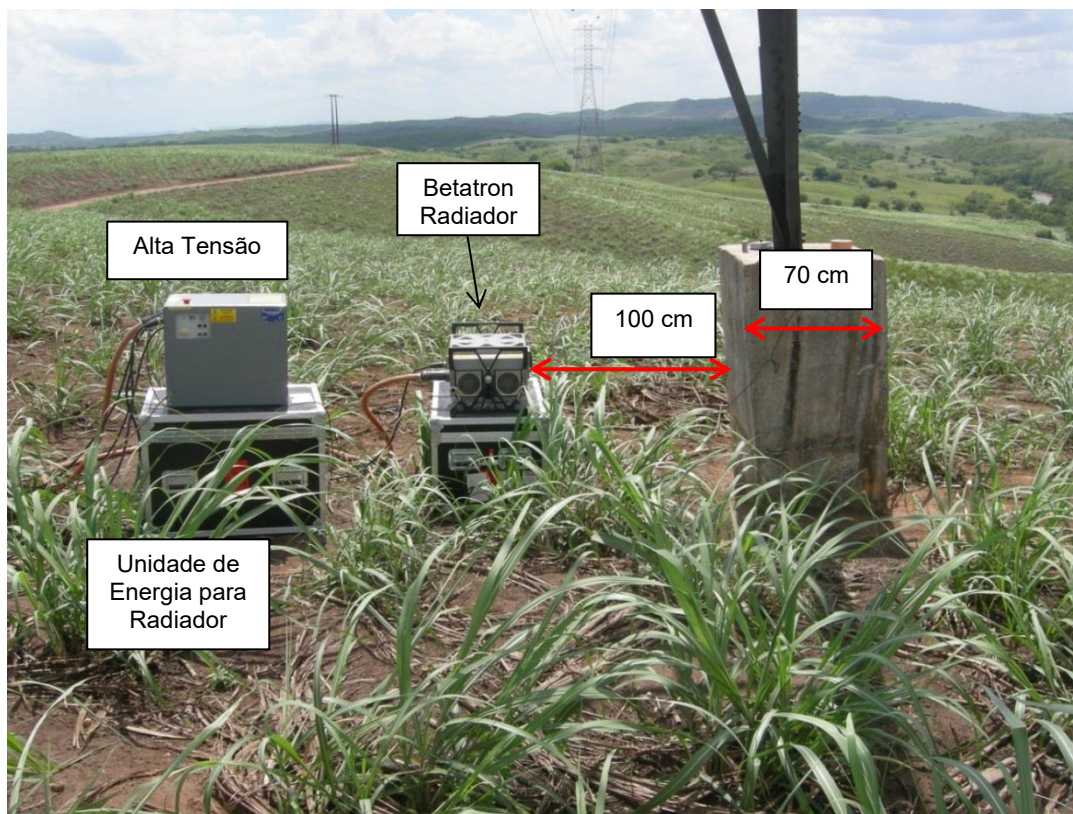
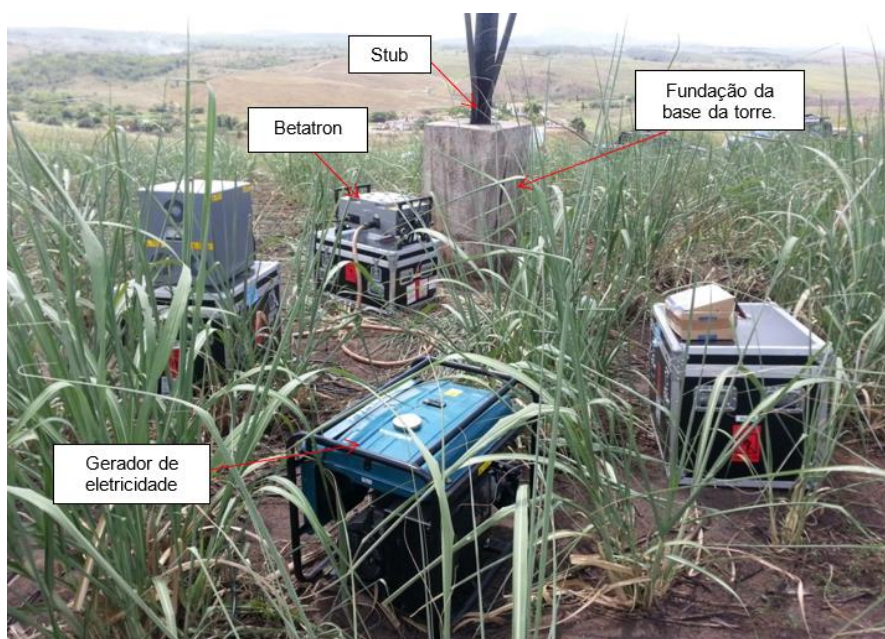


Figura 4-31- Montagem do sistema de radiografia digital de alta energia (Betatron) movido com gerador de eletricidade compacto visando radiografar uma estrutura de concreto.



Em outro momento foi realizado um novo teste em campo para radiografar as ferragens de aço na fundação da base torre 31-2 Pau Ferro em Campina Grande. O esquema adotado neste dia segue demonstrado na figura abaixo:

Figura 4-19- Esquema.



Almoxarifado da CHESF em Abreu e Lima

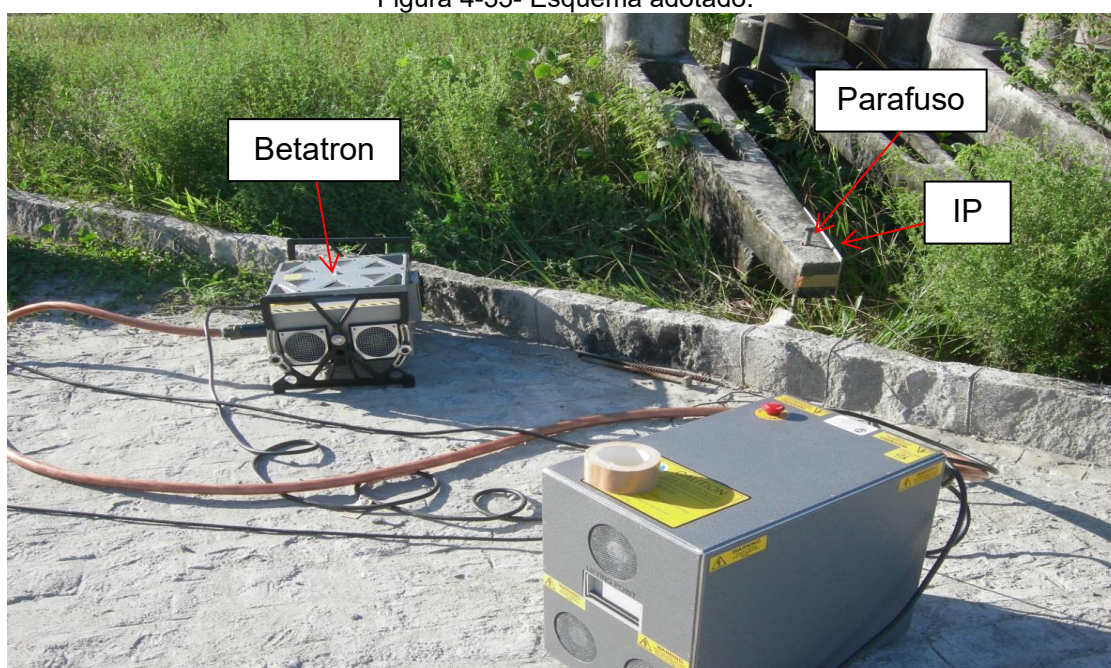
Foi realizado um novo ensaio com objetivo de radiografar parafusos na cruzeta de concreto, na Figura 4-32, no almoxarifado da CHESF em Abreu e Lima.

Figura 4-32- Parafusos na cruzeta de concreto.



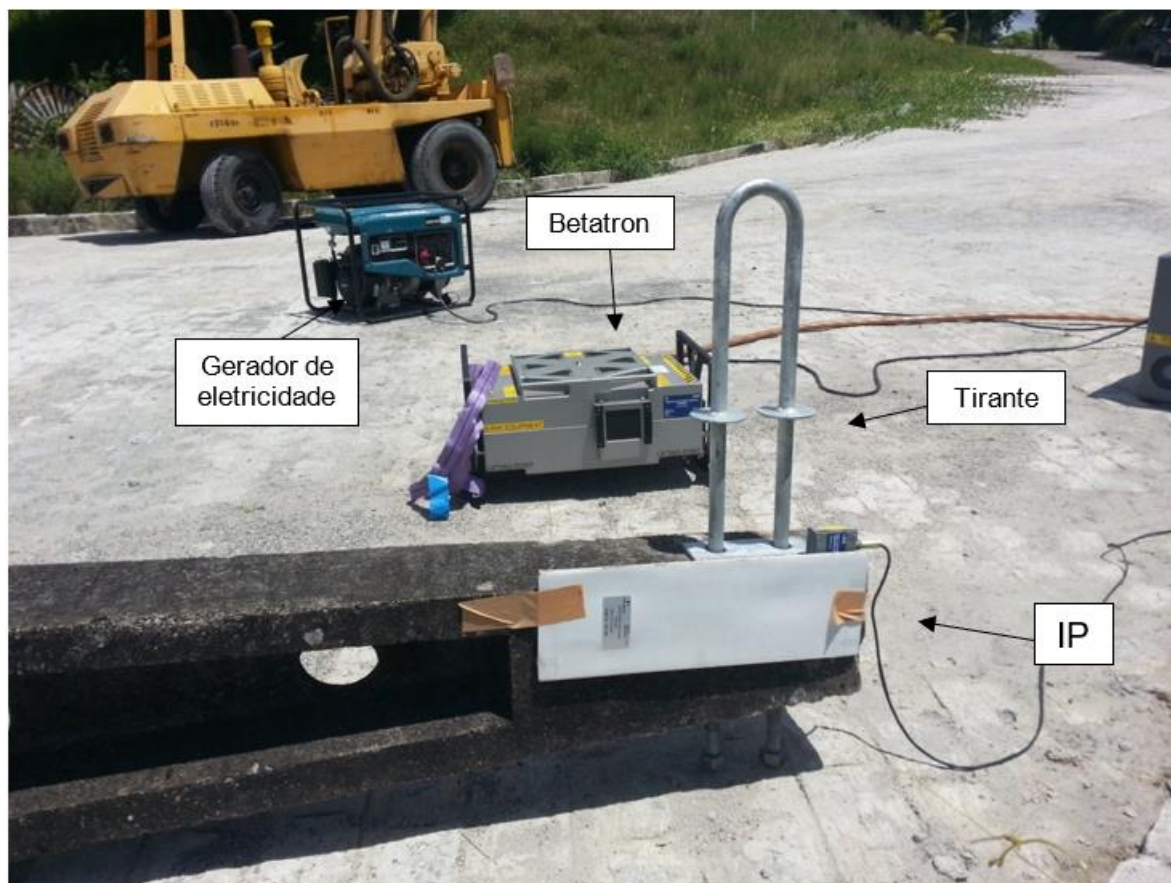
O esquema adotado para o teste de radiografia é mostrado na figura 4-33 a seguir:

Figura 4-33- Esquema adotado.



Abaixo segue o esquema adotado para o segundo ensaio com objetivo de radiografar parafusos na cruzeta de concreto, no almoxarifado da CHESF em Abreu e Lima.

Figura 4-34- Arranjo experimental para teste de radiografia no campo – Almoxarifado CHESF.



Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Uso de IQI de Fio-duplo para Avaliação da Resolução Espacial dos Sistema Radiográfico Digital de Alta Energia

Para avaliar a qualidade da imagem produzida pelo sistema radiográfico, o IQI – Indicador de Qualidade de Imagem de fio-duplo foi utilizado para avaliar a resolução espacial. Filtros físicos com chapa de cobre de 0,89 mm de espessura e uma chapa de chumbo com 1 mm de espessura foram colocadas na frente do fantoma, entre a fonte e o fantom. Este tipo de técnica permite filtragem dos fótons de baixa energia, diminuindo o espalhamento que sensibiliza o Imaging Plate, tornando a imagem com melhor qualidade, isto é, melhorando a relação sinal-ruído. As imagens foram avaliadas em sua forma original, sem utilização de filtros matemáticos.

Os parâmetros radiográficos utilizados estão listados nas tabelas 5-1 e 5-2 e os resultados discutidos logo em seguida.

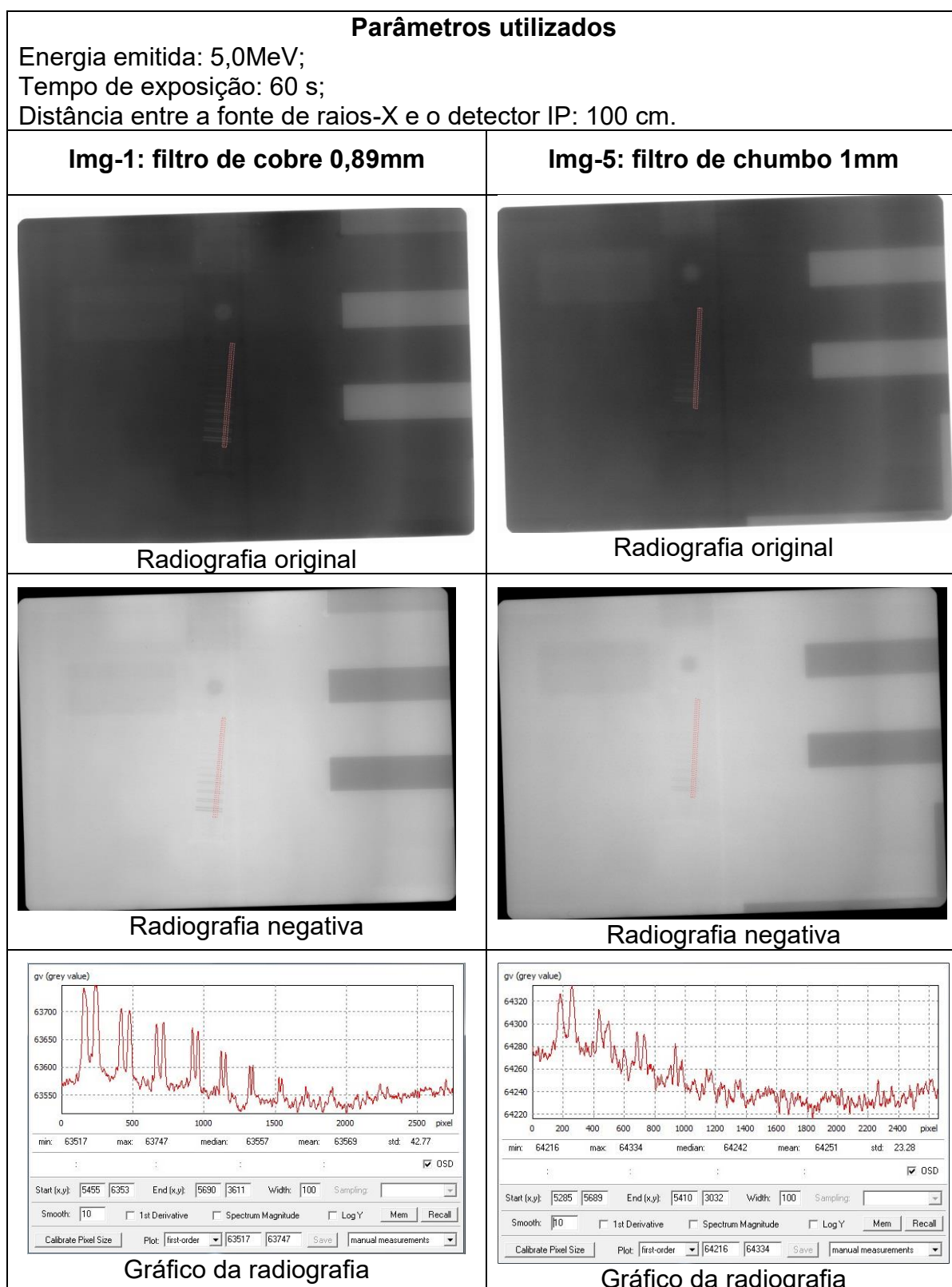
Tabela 5-1- Parâmetros da irradiação utilizando filtro de cobre.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) | Filtro |
|---------------|----------------------|------------------|----------------|
| Img-1 | 5,0 | 60 | Cobre – 0,89mm |
| Img-2 | 5,0 | 300 | Cobre – 0,89mm |
| Img-3 | 7,5 | 60 | Cobre – 0,89mm |
| Img-4 | 7,5 | 300 | Cobre – 0,89mm |

Tabela 5-2- Parâmetros da irradiação utilizando filtro de chumbo.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) | Filtro |
|---------------|----------------------|------------------|---------------|
| Img-5 | 5,0 | 60 | Chumbo – 1 mm |
| Img-6 | 5,0 | 300 | Chumbo – 1 mm |
| Img-7 | 7,5 | 60 | Chumbo – 1 mm |
| Img-8 | 7,5 | 300 | Chumbo – 1 mm |

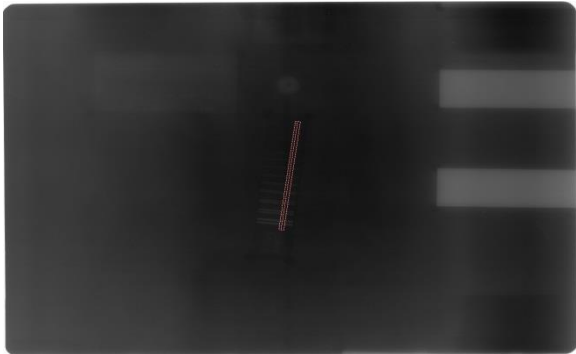

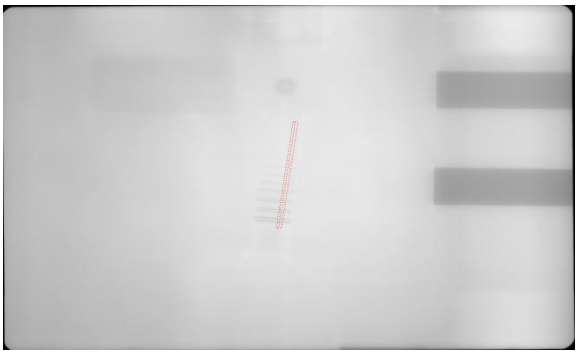
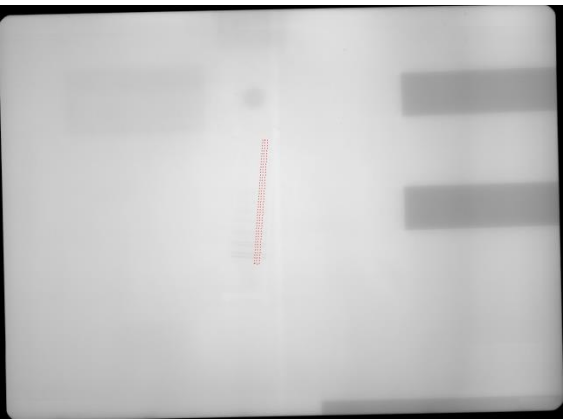
Figura 5-1- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente.

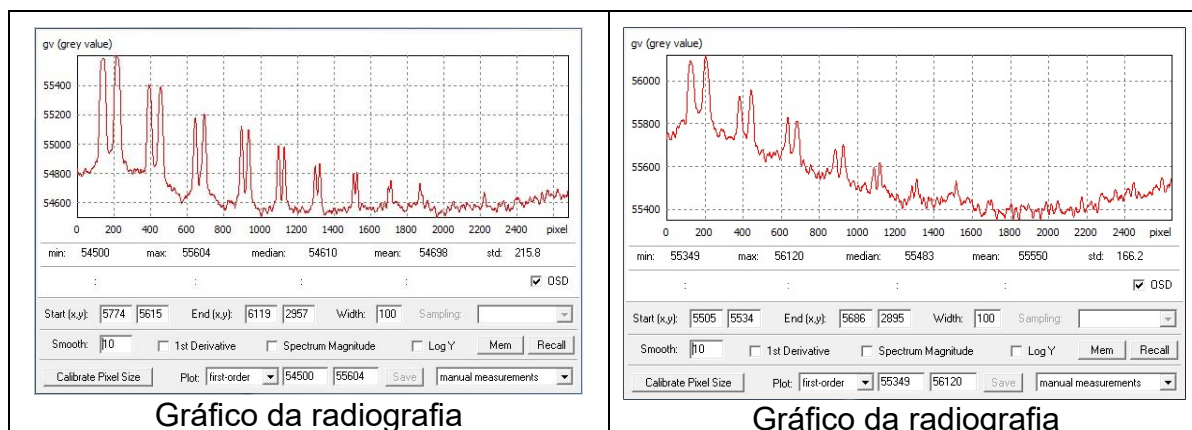


Na imagem da radiografia são observados picos destacados no gráfico da radiografia. Na imagem Img-1 pode-se observar que são formados 7 picos bem

definidos. Indicando que com esses parâmetros, objetos com até 0,20 mm se mostra com uma boa resolução, enquanto na imagem Img-5, pelo gráfico acima apenas 3 picos se formaram isso significa que o sistema se mostrou com baixíssima resolução, abaixo de 0,5 mm para as condições aplicadas, de acordo com as especificações da tabela de parâmetros do indicador de qualidade do IQI Duplex (CIT, 2003).

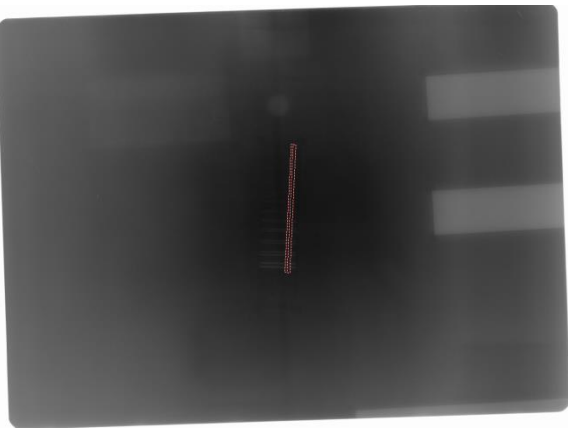
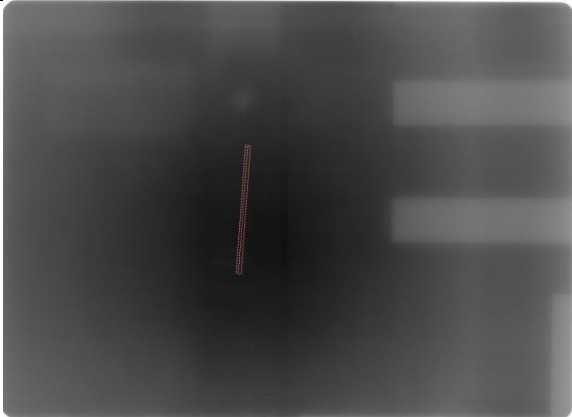
Figura 5-2- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente.

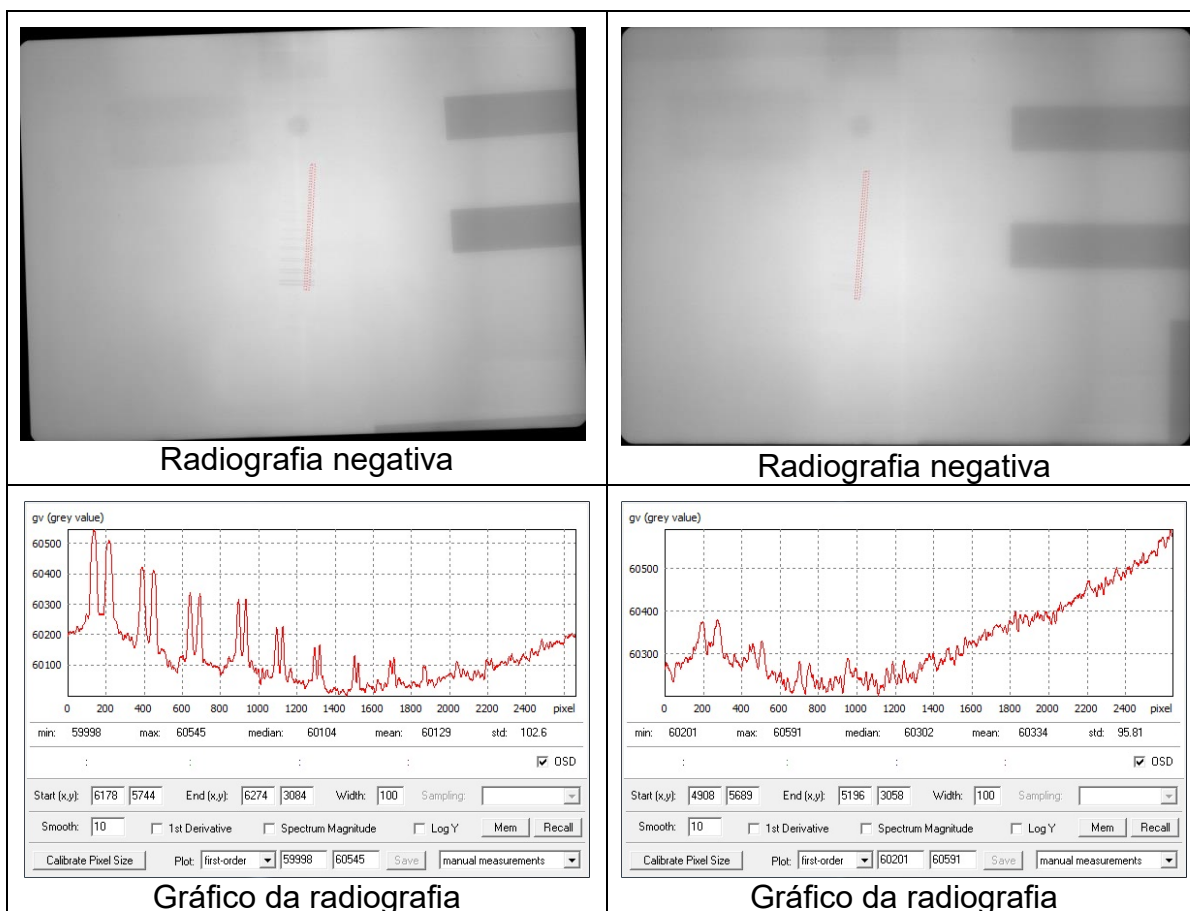
| Parâmetros utilizados Energia emitida: 5,0MeV; Tempo de exposição: 300 s; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. | |
|---|--|
| Img-2: filtro de cobre 0,89mm | Img-6: filtro de chumbo 1mm |
|  <p>Radiografia original</p> |  <p>Radiografia original</p> |
|  <p>Radiografia negativa</p> |  <p>Radiografia negativa</p> |



Na imagem Img-2 da radiografia negativa tem-se uma melhor resolução comparada a radiografia original. No gráfico da radiografia observam-se 9 picos bem definidos, isso significa que objetos com tamanhos de até 0,13 mm se mostram com boa resolução, enquanto na imagem Img-6, o gráfico da radiografia mostra que apenas 5 picos são formados e isso também mostra uma baixa resolução, abaixo de 0,32 mm, de acordo com as especificações da tabela de parâmetros do indicador de qualidade do IQI Duplex (CIT, 2003).

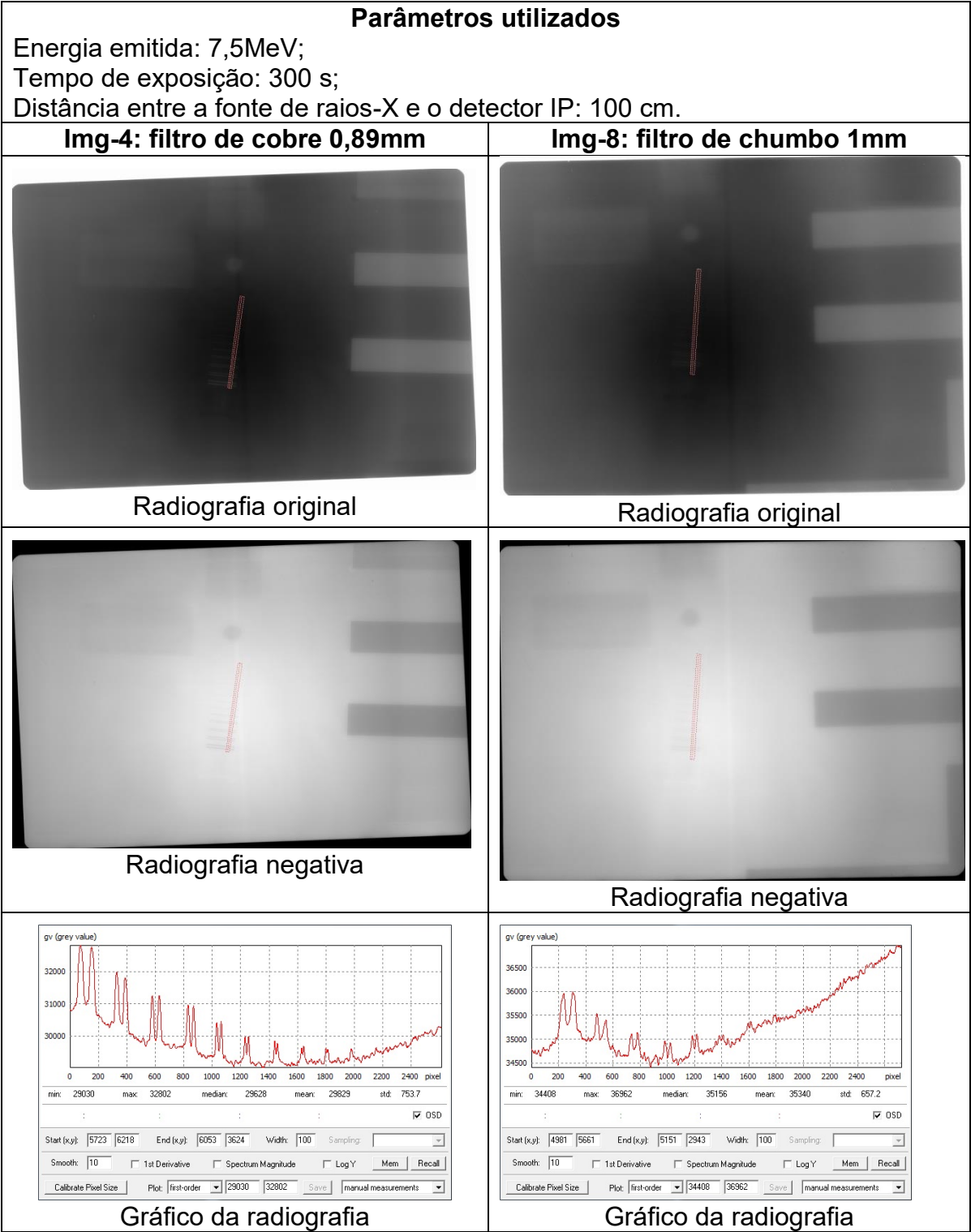
Figura 5-3- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente.

| Parâmetros utilizados | |
|--|--|
| Energia emitida: 7,5MeV; Tempo de exposição: 60 s; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. | |
| Img-3: filtro de cobre 0,89mm | Img-7: filtro de chumbo 1mm |
|  |  |
| Radiografia original | Radiografia original |



No gráfico da radiografia da imagem Img-3, são formados 8 picos bem definidos, com isso é possível formar imagens de objetos de 0,16 mm com boa resolução, enquanto na imagem Img-7, o gráfico da radiografia apenas 1 pico se forma isso indica uma imagem de péssima qualidade com resolução menor que 0,8 mm, de acordo com as especificações da tabela de parâmetros do indicador de qualidade do IQI Duplex (CIT, 2003).

Figura 5-4- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente.



No gráfico da radiografia da imagem Img-4, é possível visualizar 9 picos, indicando assim que os parâmetros utilizados permitem uma resolução com tamanho de até 0,13 mm, enquanto no gráfico da imagem Img-8 apenas 5 picos se formaram indicando a baixa qualidade da imagem onde seria possível visualizar objetos menores que 0,32

mm com boa resolução, de acordo com as especificações da tabela de parâmetros do indicador de qualidade do IQI Duplex (CIT, 2003).

Nos testes realizados de IQI de fio-duplo para avaliação da qualidade de imagem radiográfica de alta energia, de acordo com as imagens analisadas, concluímos que utilizando a técnica com o filtro de chapa de cobre, foram obtidas imagens com melhor resolução espacial do que as imagens obtidas utilizando com o filtro a chapa de chumbo.

5.2 Testes de Poder de Penetração do Raios-X de Alta Energia em Concreto sem Reforço de 200 mm até 1500 mm de Espessura com Sistema Radiográfico Computadorizado

Por questão de proteção radiológica, visando estabelecer procedimentos, os níveis de radiação na área foram monitorados pelo próprio pessoal do CRCN e estavam dentro dos níveis aceitáveis de taxa de dose, que é abaixo de 20 mSv/ano. A figura abaixo mostra uma taxa de dose de 0.157 $\mu\text{Sv/h}$, bem abaixo do permitido.

Figura 5-5- Medidor Geiger.



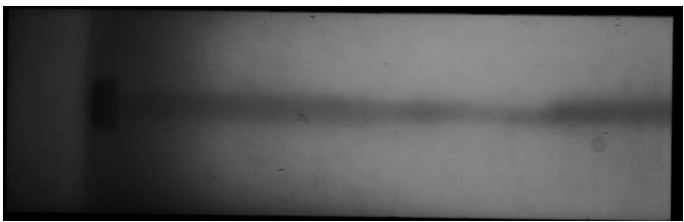
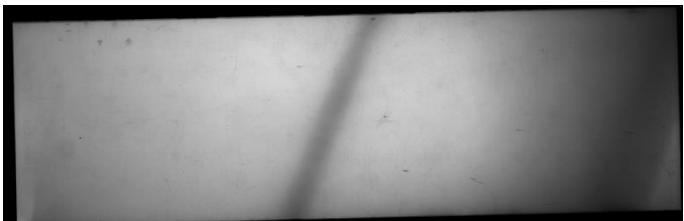

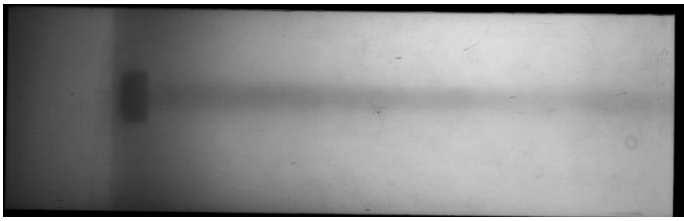
Os ensaios radiográficos a seguir usando parafuso com perda de massa devido à corrosão, conforme figura abaixo, foram realizados visando avaliar a capacidade de penetração e transmissão do feixe de raios-X, gerado por betatron, no concreto com espessura de 20 cm (0,2 m). As imagens foram visualizadas utilizando o software

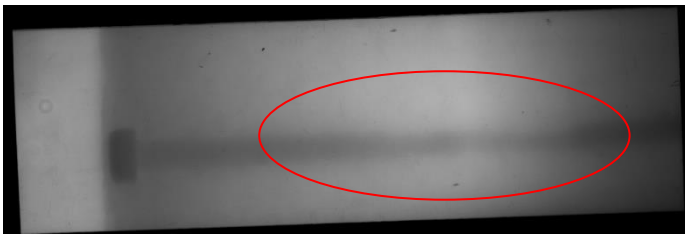
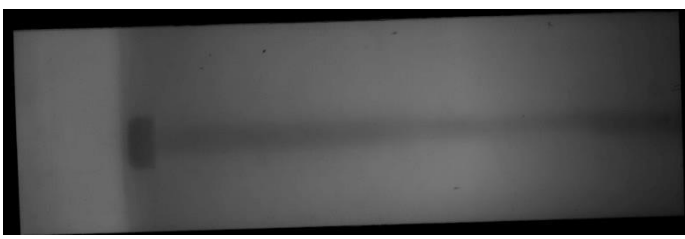
chamado ISee, desenvolvido pelo BAM (Federal Institute for Materials Research and Testing) da Alemanha. Com o objetivo de melhorar a visualização, na melhor imagem obtida utilizamos filtros matemáticos na melhor radiografia.

Tabela 5-3- Parâmetros de irradiação com distância entre a fonte e o filme de 1 metro.

| Código de Identificação Imagens | Energia (MeV) | Tempo de Exposição (s) |
|--|----------------------|-------------------------------|
| Im-20-01 | 6,0 | 60 |
| Im-20-02 | 6,0 | 180 |
| Im-20-03 | 7,5 | 220 |
| Im-20-04 | 7,5 | 120 |
| Im-20-05 | 7,5 | 80 |
| Im-20-06 | 7,5 | 60 |

Figura 5-6- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente.

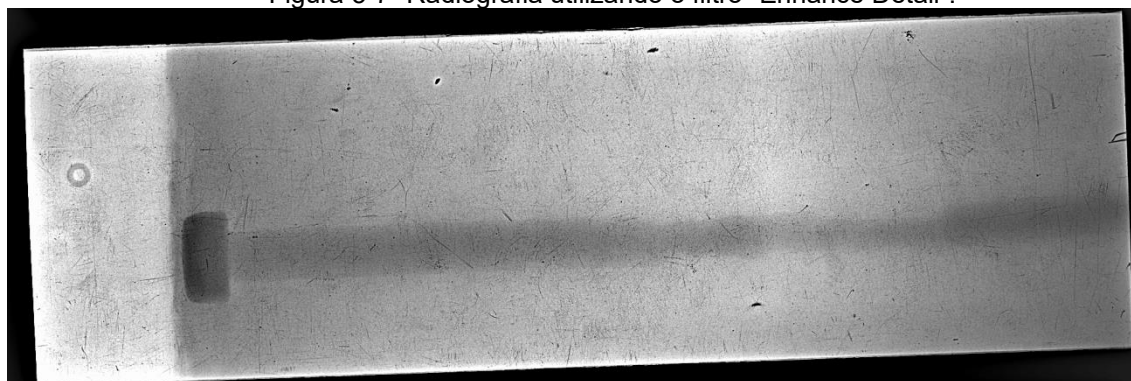
| | |
|--|--|
| Im-20-01 Energia: 6,0 MeV; Tempo de exposição: 60 s; Espessura do concreto: 20 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm |  |
| Im-20-02 Energia: 6,0 MeV; Tempo de exposição: 180 s; Espessura do concreto: 20 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-20-03 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 220 s; Espessura do concreto: 20 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-20-04 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 120 s; Espessura do concreto: 20 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |

| | |
|--|--|
| <p>Im-20-05 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 80 s; Espessura do concreto: 20 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm.</p> |  |
| <p>Im-20-06 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 60 s; Espessura do concreto: 20 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm.</p> |  |

A imagem radiográfica com melhor visualização Im-20-05, foi processada com a utilização de filtros matemáticos, com o objetivo de realçar detalhes de interesse, como segue abaixo:

- Energia emitida: 7,5 MeV
- Tempo de exposição: 80s
- Espessura do concreto: 20 cm.
- Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm.
- Filtro matemático: Filtro “Enhance Detail do Isee!”

Figura 5-7- Radiografia utilizando o filtro “Enhance Detail”.



Como teste inicial, após a utilização do filtro é possível verificar com maior clareza a perda de massa no parafuso devido ao processo de corrosão. Uma das vantagens de radiografia digital é a possibilidade de processamento de imagens digitais visando realçar detalhes de interesse.

Os próximos testes radiográficos foram realizados utilizando corpo de prova de concreto com 50 cm de espessura com o objetivo de inspecionar um parafuso de metal com alto grau de corrosão posicionado atrás do referido.



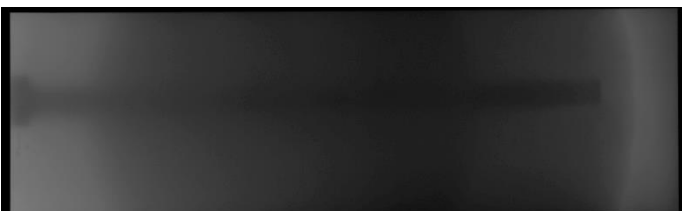
Foram realizados vários ensaios experimentais de radiografia com betatron adotando os critérios da tabela 12, variando o nível de intensidade da energia emitida (MeV) e tempo de exposição (s). Manteve-se a distância de 1 metro entre a fonte de raios-X e o detector IP Perkin Elmer 12,5 cm x 43 cm.




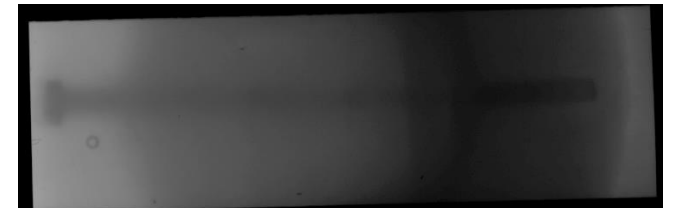
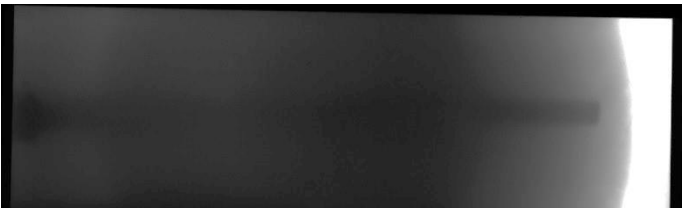
Tabela 5-4- Parâmetros de irradiação.

| Imagens | Energia (MeV) | Tempo de Exposição (s) |
|-----------------|----------------------|-------------------------------|
| Im-50-01 | 2,5 | 180 |
| Im-50-02 | 6,0 | 60 |
| Im-50-03 | 6,0 | 90 |
| Im-50-04 | 6,0 | 120 |
| Im-50-05 | 7,5 | 60 |
| Im-50-06 | 7,5 | 90 |
| Im-50-07 | 7,5 | 120 |
| Im-50-08 | 2,5 | 300 |

A seguir serão comentados os resultados das imagens radiográficas obtidas, tomando como base os critérios adotados da Intensidade da energia de raios-X (MeV) e o Tempo de Exposição(s).

Figura 5-8- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|--|--|
| Im-50-01 Energia emitida: 2,5 MeV; Tempo de exposição: 180 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-50-02 Energia Emitida: 6,0 MeV; Tempo de exposição: 60 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-50-03 Energia Emitida: 6,0 MeV; Tempo de exposição: 90 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |

| | |
|--|--|
| Im-50-04 Energia Emitida: 6,0 MeV; Tempo de exposição: 120 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-50-05 Energia Emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 60 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-50-06 Energia Emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 90 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-50-07 Energia Emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 120 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |
| Im-50-08 Energia Emitida: 2,5 MeV; Tempo de exposição: 300 s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |  |

A imagem radiográfica com melhor visualização Im-50-06, foi processada com a utilização de filtros matemáticos, com o objetivo de realçar detalhes de interesse, como segue abaixo:

- Energia emitida: 7,5 MeV
- Tempo de exposição: 90s
- Espessura do concreto: 50 cm.
- Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm.
- Filtro matemático: Filtro da mediana e Filtro de realce de detalhes

Figura 5-9- Radiografia utilizando filtro matemático: Filtro da mediana e Filtro de realce de detalhes.

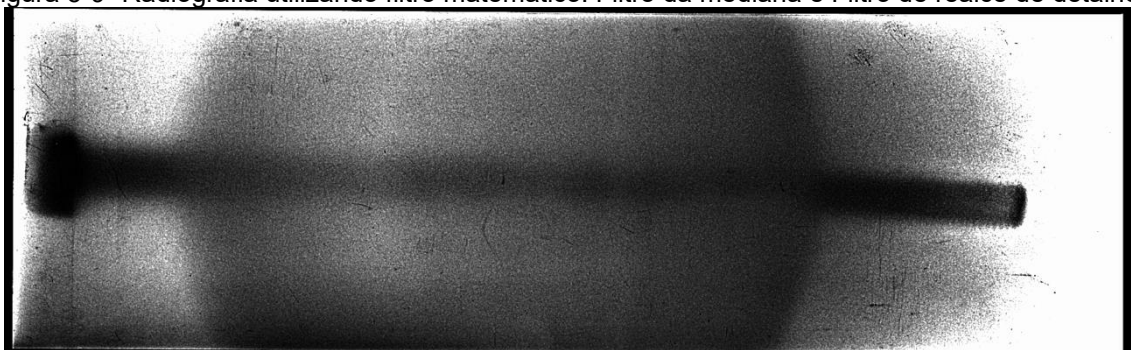
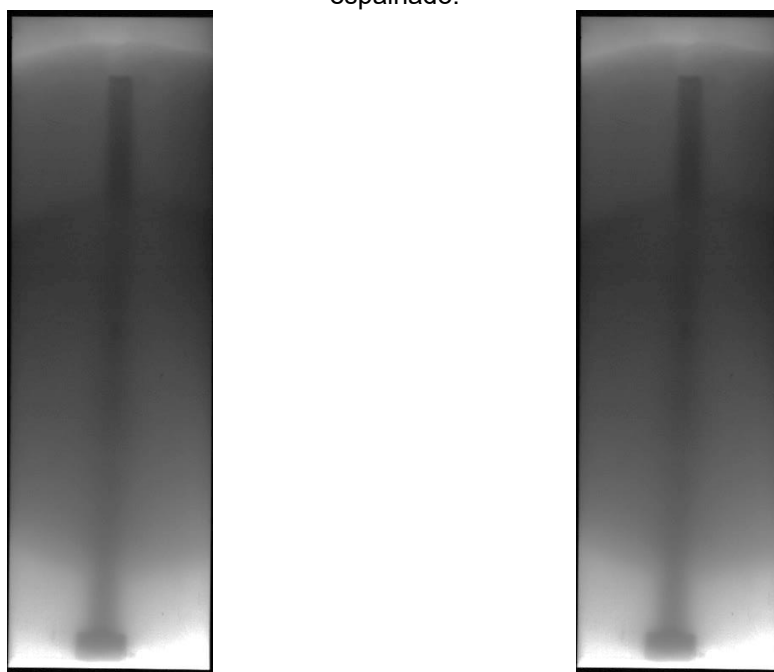


Figura 5-10- Imagem radiográfica Im-50-06 obtida com raios-X direto+espalhado e raios-X e espalhado.



Embora os fios de rosca do parafuso sejam bastante evidentes, avaliação do grau de corrosão ainda não permite observar a perda de massa.

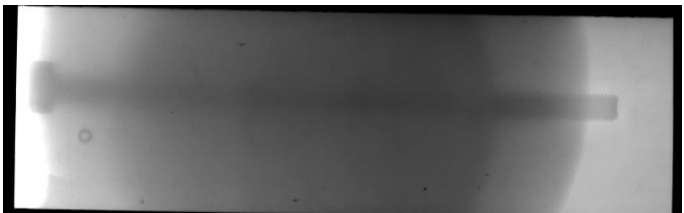
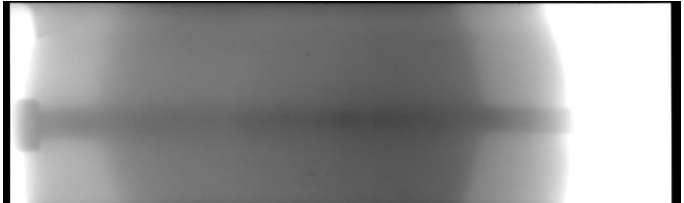
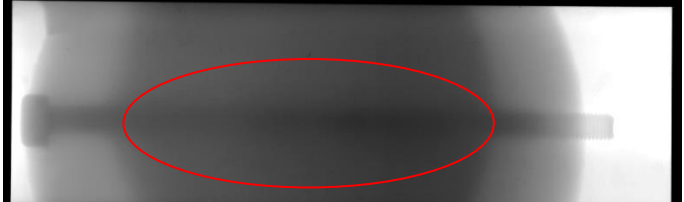


Foram realizados novos ensaios de radiografia com betatron utilizando energia de 7,5 MeV, variando o tempo de exposição em intervalos de 30s, crescente, mas com distância entre a fonte de raio-X e o detector IP – Imaging Plate de 1,5m mantendo a espessura do concreto em 50cm. A Tabela 5-5 sintetiza as diversas situações experimentadas, bem como as radiografias a seguir retratam os resultados obtidos.

Tabela 5-5- Parâmetros de irradiação distância de 1,5 entre a fonte e o objeto.

| Imagens | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|-----------------|----------------------|------------------|
| Im-50-09 | 7,5 | 300 |
| Im-50-10 | 7,5 | 180 |
| Im-50-11 | 7,5 | 120 |
| Im-50-12 | 7,5 | 90 |
| Im-50-13 | 7,5 | 60 |

A seguir serão comentados os resultados das imagens radiográficas obtidas, tomando como base os critérios adotados da Intensidade da Energia Emitida (MeV) e Tempo de Exposição (s).

Figura 5-11- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|---|--|
| Im-50-09 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 300s Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |
| Im-50-10 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 180s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |
| Im-50-11 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 120s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |
| Im-50-12 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 90s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |
| Im-50-13 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 60s; Espessura do concreto: 50 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |

A imagem radiográfica Im-50-11 com melhor visualização foi processada com a utilização de filtros matemáticos, com o objetivo de realçar detalhes de interesse, como segue abaixo:

- Energia emitida: 7,5 MeV
- Tempo de exposição: 120s
- Espessura do concreto: 50 cm.
- Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm.
- Filtro matemático: Filtro da mediana e Filtro de realce de detalhes.

Figura 5-12- Radiografia obtido utilizando o processamento software ISee!.

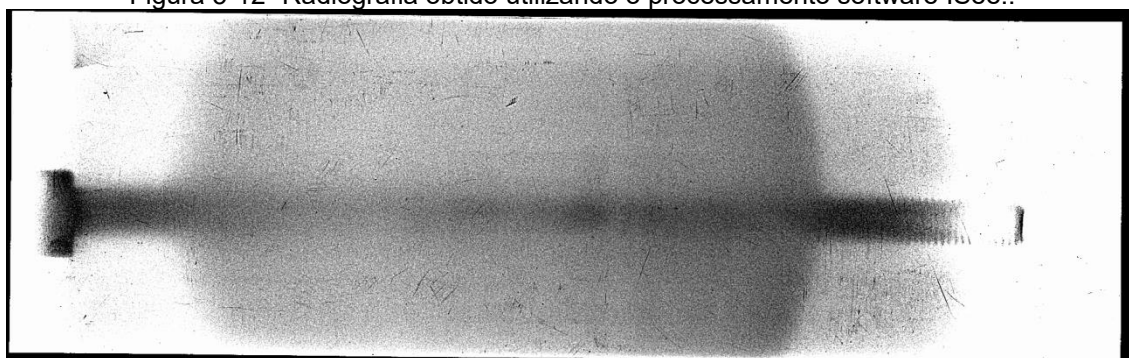
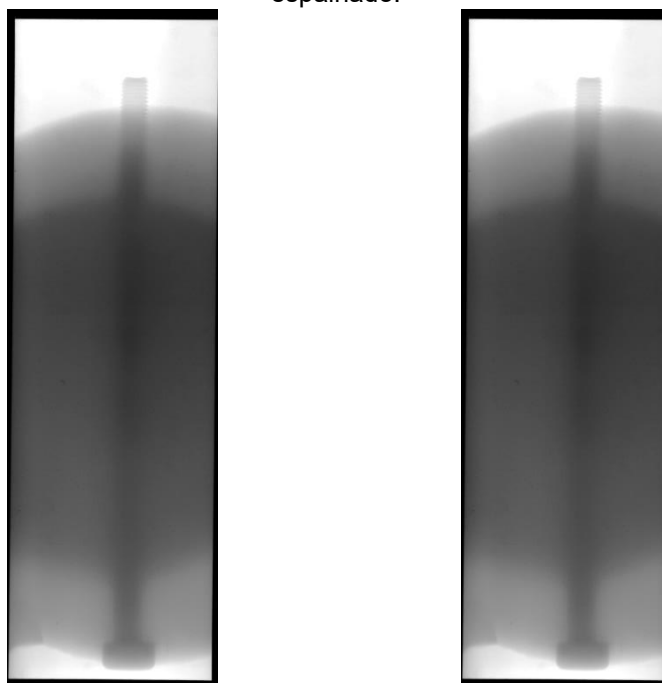


Figura 5-13- Imagem radiográfica Im-50-11 obtida com raios-X direto+espalhado e raios-X e espalhado.



Embora a rosca do parafuso seja bastante evidente e clara, avaliação do grau de corrosão não permite avaliar de forma clara a perda de massa.


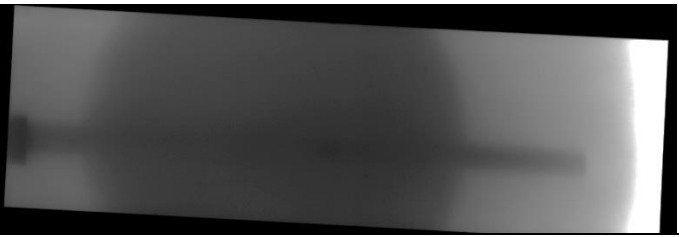

Foram realizados novos ensaios experimentais de radiografia com betatron utilizando 02 corpos de prova de concreto com 50 cm de espessura cada, posicionados de forma subsequente totalizando um comprimento linear de 100 cm, com o objetivo de inspecionar um parafuso de metal com alto grau de corrosão localizado atrás do referido anteparo de concreto.

Os testes radiográficos foram realizados adotamos os critérios da Tabela 5-6, variando a intensidade da energia emitida (MeV) e tempo de exposição (s). A distância entre a fonte de raios-X e o objeto foi 2 metros.

Tabela 5-6- Parâmetros de irradiação.

| Imagens | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|------------------|----------------------|------------------|
| Im-100-14 | 2,5 | 180 |
| Im-100-15 | 7,5 | 180 |
| Im-100-16 | 7,5 | 300 |

Figura 5-14- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|---|--|
| Im-100-14 Energia emitida: 2,5 MeV; Tempo de exposição: 180s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200 cm. |  |
| Im-100-15 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 180s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200 cm. |  |
| Im-100-16 Energia emitida: 7.5 MeV; Tempo de exposição: 300s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200 cm. |  |

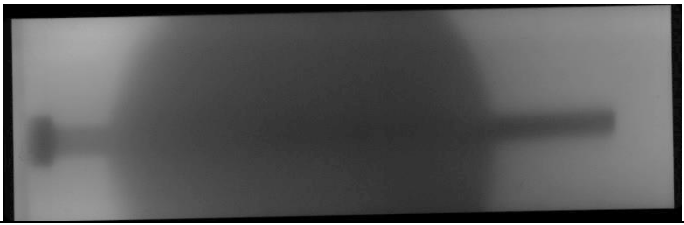
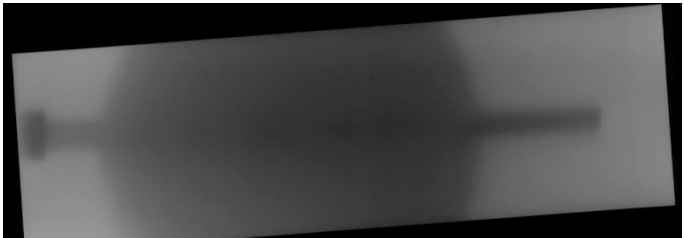
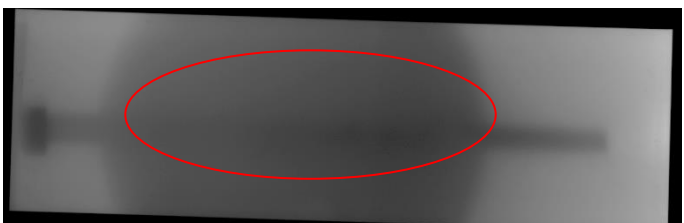
Tendo em vista a obtenção de resultados não satisfatórios e visando melhorar a resolução, decidiu-se diminuir a distância entre a fonte de raios-X e o detector IP – Imaging Plate de 2,0 metros para 1,5 metro, bem como realizar novos ensaios de radiografia com betatron utilizando o nível de energia emitida em 7,5 MeV, variando o tempo de exposição (s), conforme mostra a Tabela 5-7.

Tabela 5-7- parâmetros de irradiação

| Imagens | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|------------------|----------------------|------------------|
| Im-100-17 | 7,5 | 120 |
| Im-100-18 | 7,5 | 180 |
| Im-100-19 | 7,5 | 300 |

A seguir serão comentados os resultados das imagens radiográficas obtidas, tomando como base os critérios adotados da intensidade da energia emitida (MeV) e tempo de exposição (s).

Figura 5-15- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|---|--|
| Im-100-17 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 120s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |
| Im-100-18 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 180s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |
| Im-100-19 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 300s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm. |  |

A imagem radiográfica Im-100-19 com melhor visualização foi processada com a utilização de filtros matemáticos, com o objetivo de realçar detalhes de interesse, como segue abaixo:

- Energia emitida: 7,5 MeV
- Tempo de exposição: 300s
- Espessura do concreto: 100 cm.
- Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 150 cm.
- Filtro matemático: Filtro da mediana e Filtro de realce de detalhes

Figura 5-16- Radiografia obtido utilizando o processamento software ISee!.

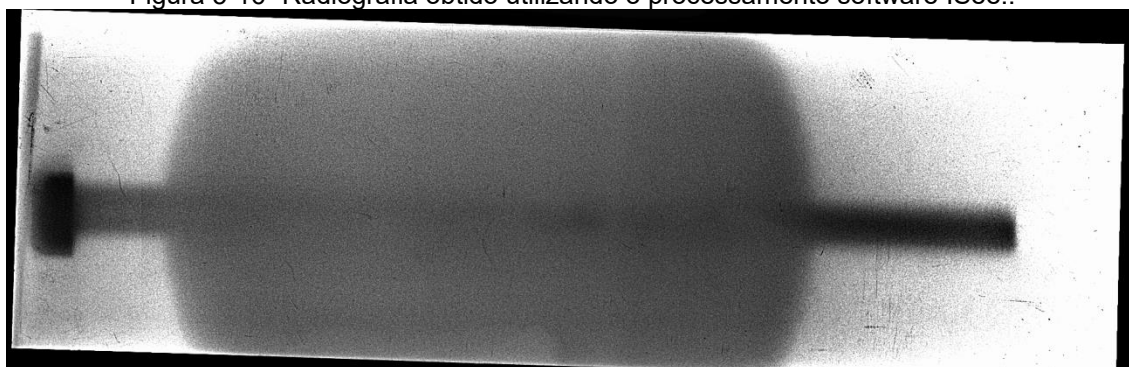
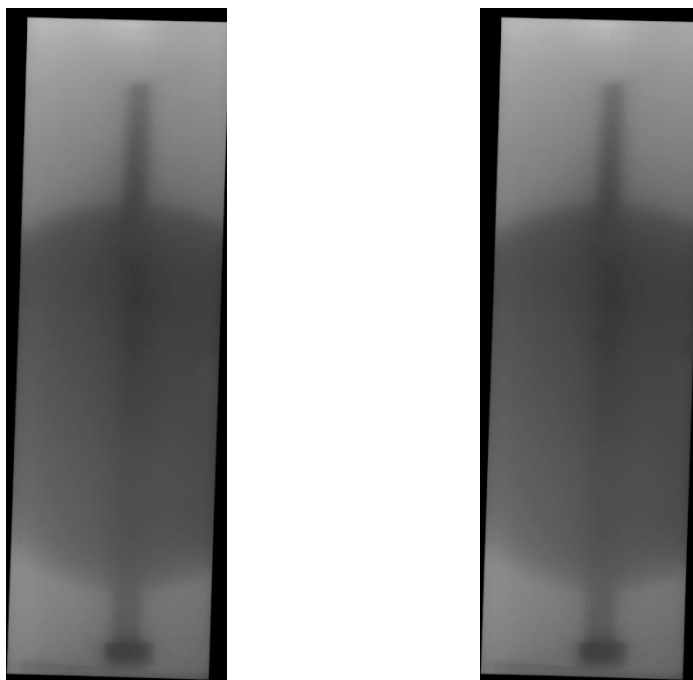


Figura 5-17- Imagem radiográfica Im-100-19 obtida com raios-X direto+espalhado e raios-X e espalhado.



Embora a rosca do parafuso seja visível, o presente processamento e avaliação do grau de corrosão não permite avaliar de forma clara a perda de massa.

Novos testes radiográficos foram realizados utilizando 03 corpos de prova de concreto com 50 cm de espessura cada, posicionados de forma subsequente totalizando um comprimento linear de 150 cm, com o objetivo de inspecionar um parafuso de metal com alto grau de corrosão localizado atrás do referido anteparo de concreto.



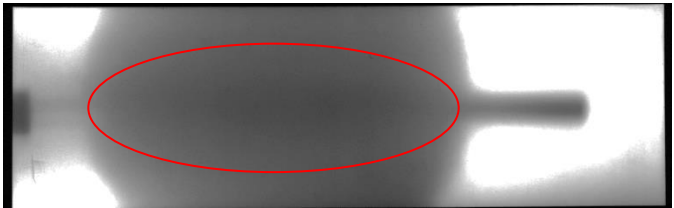
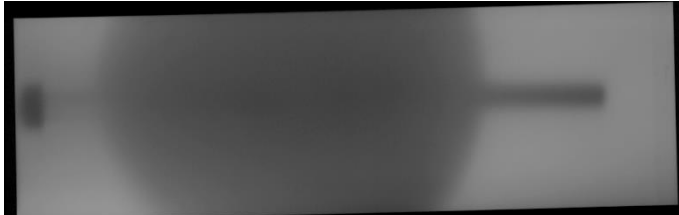
Manteve-se o nível de energia emitida pelo Betatron em 7,5 MeV, distância entre o objeto e a fonte em 2 metros e variando o tempo de exposição (s), conforme a Tabela 5-8.



Tabela 5-8- Energia e tempo de exposição.

| Imagens | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|------------------|---------------|-----------|
| Im-150-20 | 7,5 | 120 |
| Im-150-21 | 7,5 | 180 |
| Im-150-22 | 7,5 | 300 |
| Im-150-23 | 7,5 | 420 |
| Im-150-24 | 7,5 | 600 |
| Im-150-25 | 7,5 | 900 |

A seguir serão comentados os resultados das imagens radiográficas obtidas, tomando como base nas condições adotadas em termos de intensidade de energia emitida (MeV) e tempo de exposição (s).

Figura 5-18- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|---|--|
| Im-150-20 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 120 s; Espessura do concreto: 150 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200cm. |  |
| Im-150-21 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 180s; Espessura do concreto: 150 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200cm. |  |
| Im-150-22 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 300s; Espessura do concreto: 150 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200cm. |  |
| Im-150-23 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 420s; Espessura do concreto: 150 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200cm. |  |

| | |
|---|--|
| <p>Im-150-24 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 600s; Espessura do concreto: 150 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200cm.</p> |  |
| <p>Im-150-25 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 900s; Espessura do concreto: 150 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200cm.</p> |  |

A imagem radiográfica Im-150-22 com melhor visualização foi processada com a utilização de filtros matemáticos, com o objetivo de realçar detalhes de interesse, como segue abaixo:

- Energia emitida: 7,5 MeV
- Tempo de exposição: 300s
- Espessura do concreto: 150 cm.
- Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 200 cm.
- Filtro matemático: Filtro da mediana e Filtro de realce de detalhes.

Figura 5-19- Imagem radiográfica obtida utilizando o processamento software ISee!.

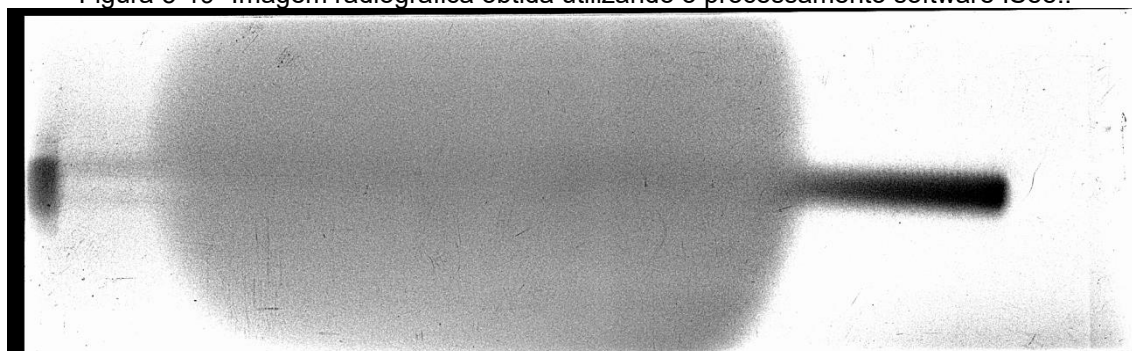
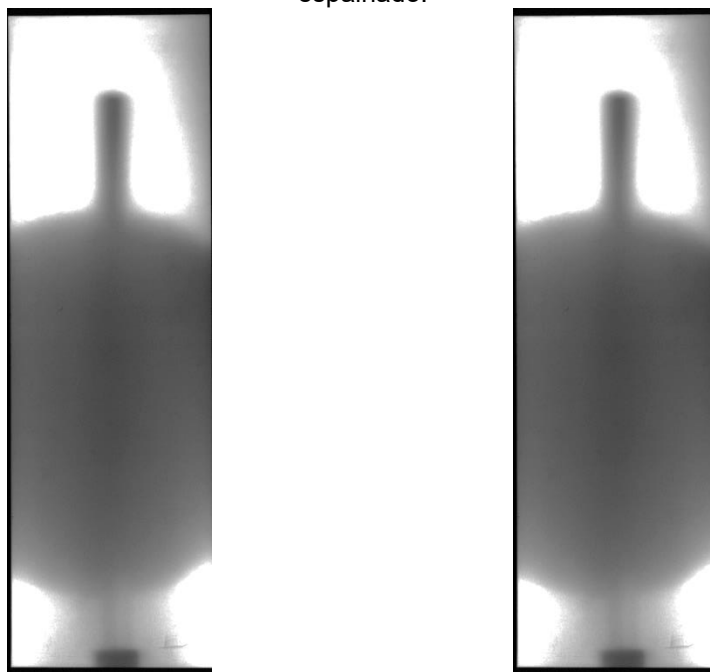


Figura 5-20- Imagem radiográfica Im-100-22 obtida com raios-X direto+espalhado e raios-X e espalhado.



Embora a rosca do parafuso seja visível, o presente processamento e avaliação do grau de corrosão não permite avaliar de forma clara a perda de massa. Nota-se também artefatos (linhas verticais claras).

Várias imagens radiográficas foram obtidas com energia de raios-X variando de 2,5 MeV a 7,5 MeV. Testes iniciais com o sistema de radiografia digital de alta energia mostram que observar o parafuso no interior do concreto até 150 cm de espessura é possível visualizando as imagens através do software ISee! com utilização dos filtros matemáticos: Filtro da mediana e Filtro de realce de detalhes. Por outro lado, não foi possível observar, com a nitidez esperada, o grau de corrosão do parafuso com perda de massa no interior do concreto.

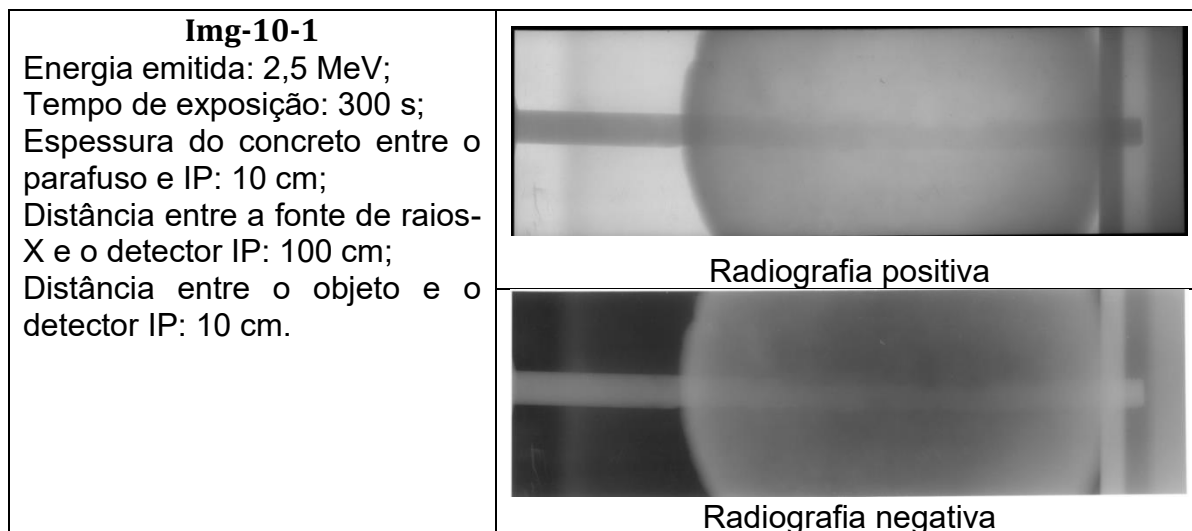
Foi realizado um ensaio radiográfico utilizando concreto com 10 cm de espessura com o objetivo de radiografar um parafuso de metal, com alto grau de corrosão disposto entre a fonte de raios-X e o bloco de concreto. Esta configuração há somente ar entre a fonte de raios-X e o parafuso metálico.

Os parâmetros utilizados seguiram a tabela 5-9.

Tabela 5-9- Parâmetros de irradiação.

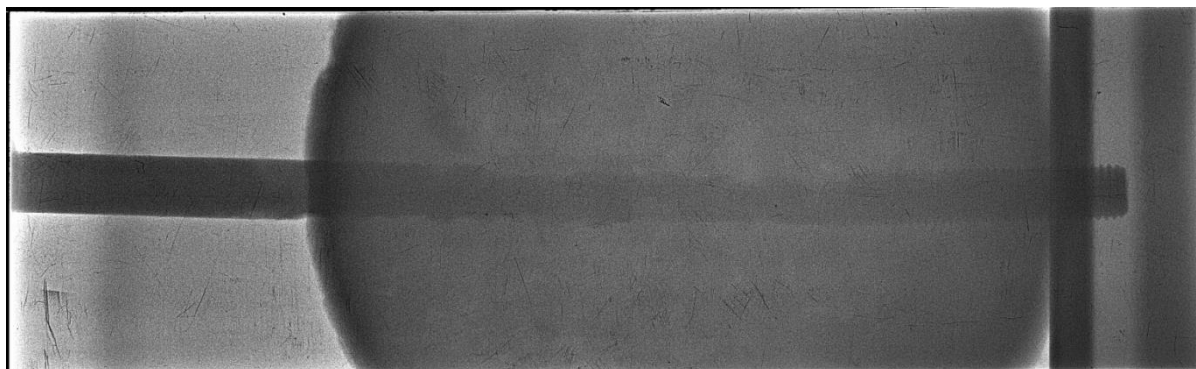
| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|----------|---------------|-----------|
| Img-10-1 | 2,5 | 300 |

Figura 5-21- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente



A imagem acima apresentou boa qualidade e foi processada utilizando o filtro da mediana e o filtro de realce de detalhes, melhorando a visualização de detalhes conforme a Figura 5-22.

Figura 5-22- Radiografia visualizada após a utilização de filtros matemáticos.



Nesta imagem é possível verificar bem a corrosão existente no parafuso, levando a uma boa inspeção da sua estrutura.

Acrescentado 20 cm de concreto entre o parafuso e a fonte de raios-X para verificar a sua influência na qualidade de imagens radiográficas ficam com esse adicional de concreto e aproximando das estruturas em campo. Nesta configuração,





a espessura de concreto passou para 30 cm e a distância entre a fonte de raios-X e concreto ficou em 70 cm.

Os parâmetros utilizados seguiram a tabela 5-10.

Tabela 5-10- Parâmetros de irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|---------------|----------------------|------------------|
| Img-30-2 | 5,0 | 300 |
| Img-30-3 | 7,5 | 300 |

Figura 5-23- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|--|--|
| <p>Img-30-2 Energia emitida: 5,0MeV; Tempo de exposição: 300 s; Espessura do concreto: 30 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 10 cm.</p> |  |
| |  |
| <p>Img-30-3 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 300 s; Espessura do concreto: 30 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 10 cm.</p> |  |
| |  |

Aumentou-se a energia do raios-X (MeV), mantendo-se o tempo de exposição (s), porém, também não foi possível visualizar o parafuso nitidamente.

Acrescentado mais 10 cm de concreto a frente do parafuso, totalizando 40 cm de concreto, a distância da fonte para o concreto de 60 cm e com 1 m entre a fonte e

o filme, o parafuso está a 10 cm do filme, como mostra a Figura a seguir. Essa disposição se assemelha as estruturas encontradas em campo.

Os parâmetros utilizados seguem na tabela 5-11.

Tabela 5-11- Parâmetros de irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|---------------|----------------------|------------------|
| Img-40-4 | 7,5 | 600 |
| Img-40-5 | 7,5 | 900 |

Figura 5-24- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|--|----------------------|
| Img-40-4 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 600 s; Espessura do concreto: 40 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 10 cm. | |
| | Radiografia positiva |
| Img-40-5 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 900 s; Espessura do concreto: 40 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 10 cm. | |
| | Radiografia negativa |
| Img-40-5 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 900 s; Espessura do concreto: 40 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 10 cm. | |
| | Radiografia positiva |
| Img-40-5 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 900 s; Espessura do concreto: 40 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 10 cm. | |
| | Radiografia negativa |

Pelas imagens acima mostradas não foi possível obter uma imagem satisfatória para uma boa inspeção, isso se deve ao fato de que os parâmetros utilizados ainda não foram os ideais para este tipo de teste.

Foram realizados novos testes radiográficos com o objetivo de radiografar um parafuso de metal corroído posicionado entre duas estruturas de concreto com 50 cm

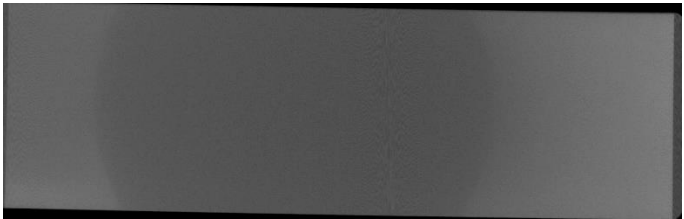


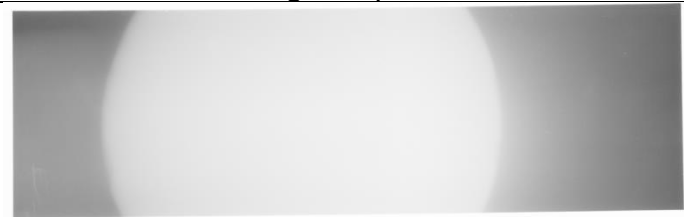
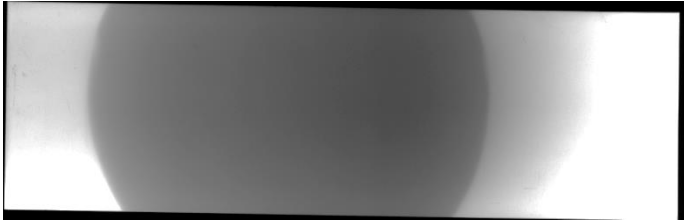
de espessura cada. Posicionou-se a fonte de raios-X a 100 cm do detector IP - Imaging Plate, enquanto a distância entre o parafuso para o Imaging Plate foi de 50.


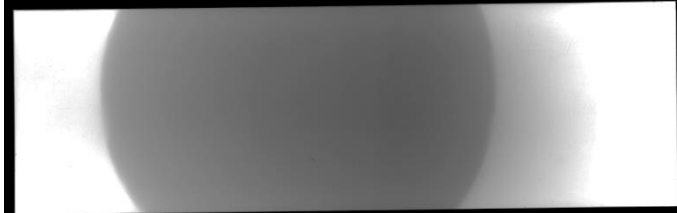

Os parâmetros utilizados seguem na tabela 5-12.

Tabela 5-12- Parâmetros de irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|---------------|----------------------|------------------|
| Img-100-1 | 2,5 | 180 |
| Img-100-2 | 7,5 | 300 |
| Img-100-3 | 7,5 | 450 |
| Img-100-4 | 7,5 | 600 |

Figura 5-25- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|--|--|
| Img-100-1 Energia emitida: 2,5 MeV; Tempo de exposição: 180 s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm. |  |
| | Radiografia positiva  |
| Img-100-2 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 300 s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm. |  |
| | Radiografia positiva  |
| Img-100-3 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 450 s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; |  |
| | Radiografia negativa |

| | |
|--|---|
| Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm. | <div data-bbox="932 241 1214 277" data-label="Caption">Radiografia positiva</div>  <div data-bbox="925 499 1220 535" data-label="Caption">Radiografia negativa</div> |
| Img-100-4 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 600 s; Espessura do concreto: 100 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm. | <div data-bbox="730 551 1410 763">  </div> <div data-bbox="932 768 1214 804" data-label="Caption">Radiografia positiva</div> <div data-bbox="730 808 1410 1021">  </div> <div data-bbox="925 1025 1220 1061" data-label="Caption">Radiografia negativa</div> |

Através das imagens radiográficas acima, pode-se observar um círculo em destaque que corresponde à parte do bloco de concreto e com o aumento no tempo de exposição (s) mostrou uma melhora no contraste da imagem. O fato de o parafuso não aparecer nas imagens, foi devido à forma como ocorreu a projeção do parafuso na imagem radiográfica do filme e não pela quantidade de energia do feixe e nem ao tempo de exposição escolhidos nas imagens Img-100-2, Img-100-3 e Img-100-4. Isso acontece porque a imagem formada do parafuso se projeta com tamanho maior e perde sua definição na área do filme, devido à grande distância entre o parafuso e o filme. Por isso uma condição ideal de radiografia é posicionar o filme mais próximo possível do objeto. Sendo 50 cm uma distância muito grande (entre o objeto e o filme), para se formar a imagem do parafuso.


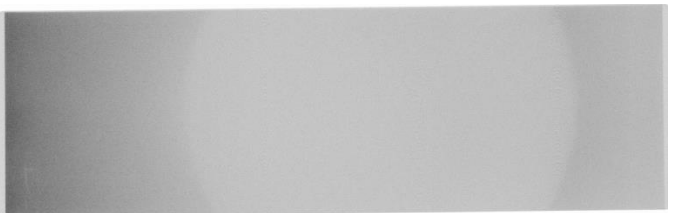

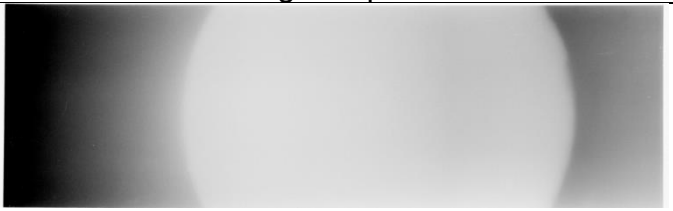

Novos ensaios radiográficos foram realizados utilizando estrutura de concreto com 75 cm de espessura (duas estruturas de concreto, uma com 50 cm de espessura e outra com 25 cm) com o objetivo de radiografar um parafuso de metal com alto grau de corrosão disposto entre os dois blocos de concreto. Essa disposição diminui a distância e quantidade de concreto entre a fonte e o parafuso.


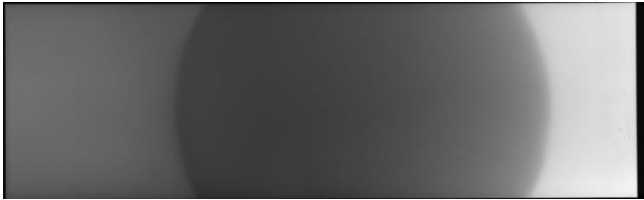
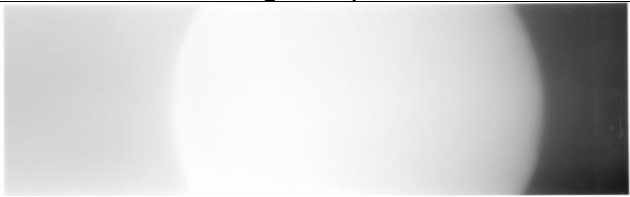
Segue abaixo a tabela com os parâmetros radiográficos utilizados:

Tabela 5-13- Parâmetros radiográficos

| Nome da Imagem | Energia (MeV) | Tempo de Exposição (s) |
|----------------|---------------|------------------------|
| Img-75-1 | 2,5 | 300 |
| Img-75-2 | 5,0 | 300 |
| Img-75-3 | 5,0 | 450 |
| Img-75-4 | 5,0 | 600 |

Figura 5-26- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|---|--|
| <p>Img-75-1 Energia emitida: 2,5 MeV; Tempo de exposição: 300 s; Espessura do concreto: 75 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 70 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm.</p> |  <p>Radiografia positiva</p> |
| |  <p>Radiografia negativa.</p> |
| <p>Img-75-2 Energia emitida: 5,0 MeV; Tempo de exposição: 300 s; Espessura do concreto: 75 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 70 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm.</p> |  <p>Radiografia positiva</p> |
| |  <p>Radiografia negativa</p> |
| <p>Img-75-3 Energia emitida: 5,0 MeV; Tempo de exposição: 450 s; Espessura do concreto: 75 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 70 cm;</p> |  <p>Radiografia positiva</p> |

| | |
|---|--|
| Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm. |  Radiografia negativa |
| Img-75-4 Energia emitida: 5,0 MeV; Tempo de exposição: 600 s; Espessura do concreto: 75 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 70 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 50 cm. |  Radiografia positiva |
| |  Radiografia negativa |

As mesmas características observadas nos ensaios radiográficos com o parafuso de metal corroído posicionado entre duas estruturas de concreto com 50 cm de espessura cada foram novamente vistas no presente ensaio. Não houve, nestes ensaios, visualização do parafuso, novamente devido a grande distância entre o objeto e o detector de Imaging Plate.

Foram realizados novos ensaios radiográficos utilizando uma estrutura de concreto com 23 cm de espessura, contendo em seu meio uma cavidade vazia com diâmetro de 8 cm, com o objetivo de radiografar um parafuso de metal corroído, posicionado dentro dessa cavidade à 6 cm de distância do filme.

Tabela 5-14- Parâmetros de irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|--------|---------------|-----------|
| Img-1 | 2.5 | 180 |
| Img-2 | 2.5 | 300 |

Resultados dos testes.

a) Critério Adotado Img-1:

Energia emitida: 2,5 MeV;

Tempo de exposição: 180 s;

Espessura do concreto: 23 cm;

Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 23 cm;

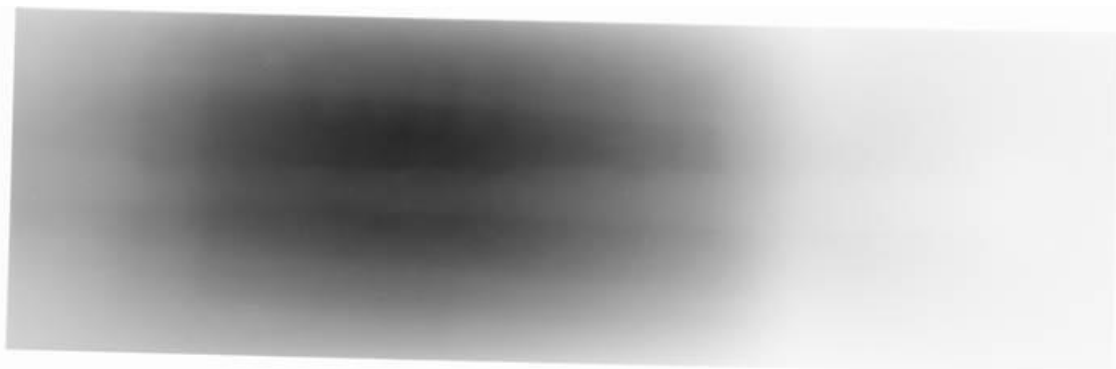
Distância entre o objeto e o detector IP: 6 cm.

Figura 5-27- Radiografia visualizada sem utilização de filtros matemáticos



Abaixo a mesma imagem da figura 5-27, com cor negativa, sem utilização de filtro.

Figura 5-28- Radiografia visualizada utilizando cor invertida sem utilização de filtros matemáticos.



Nesta radiografia é possível visualizar o parafuso e as ferragens existentes no bloco de concreto utilizado. Mesmo com baixa energia emitida, pela imagem já é possível visualizar a corrosão do parafuso.

b) Critério Adotado Img-2:

Energia emitida: 2,5 MeV;

Tempo de exposição: 300 s;

Espessura do concreto: 23 cm;

Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 23 cm;

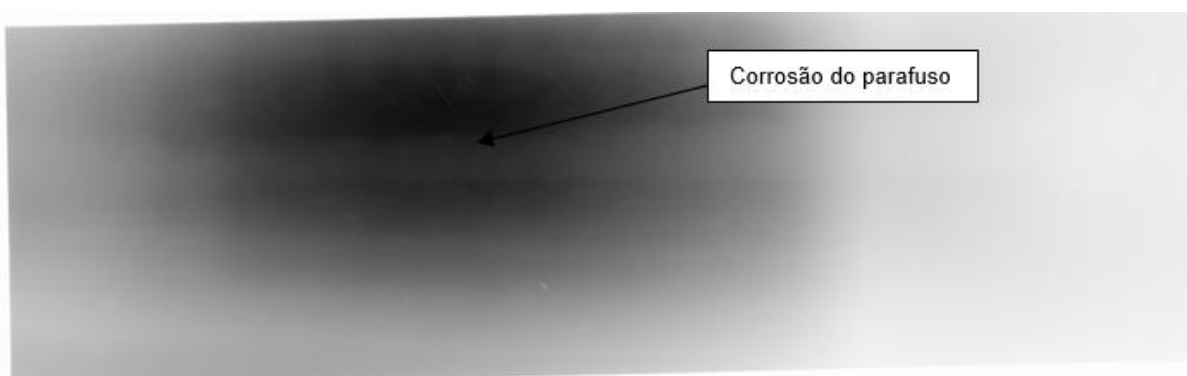
Distância entre o objeto e o detector IP: 6 cm.

Figura 5-29- Radiografia visualizada sem utilização de filtros matemáticos.



Abaixo a mesma imagem da figura 5-29, com cor negativa, sem utilização de filtro.

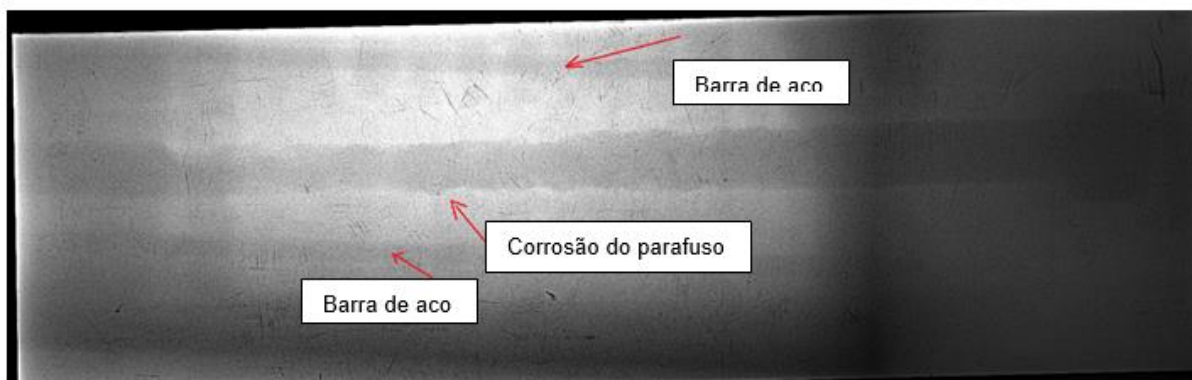
Figura 5-30- Radiografia visualizada utilizando cor invertida sem utilização de filtros matemáticos.



Aumentando o tempo de exposição (s) foi possível melhorar a qualidade da imagem melhorando a visualização do desgaste do parafuso.

Através das imagens acima, é possível observar o parafuso e a corrosão que ele apresenta, também é possível observar barras de aço que fazem parte da estrutura do concreto. Para tentar melhorar a observação dessas estruturas foi feito um processamento utilizando filtros matemáticos na imagem da img-2, da tabela 5-14, como mostra os destaques na figura 5-31.

Figura 5-31- Radiografia processada utilizando de filtros matemáticos: filtro da mediana e o filtro de realce de detalhes.



Pela imagem acima é possível visualizar bem a corrosão e as barras de aço apontadas pelas setas.

Foram realizados novos ensaios radiográficos utilizando estrutura de concreto, com o objetivo de radiografar um parafuso de metal corroído, posicionado na cavidade do bloco de concreto afastado a 14 cm do filme e a 30 cm da fonte. Com isso o parafuso fica mais afastado do filme e vemos como a formação da imagem devido a este afastamento se comporta.

Tabela 5-15- Parâmetros de irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|--------|---------------|-----------|
| Img-1 | 2.5 | 180 |
| Img-2 | 5.0 | 180 |
| Img-3 | 7.5 | 180 |

Resultados dos testes.

a) Critério Adotado Img-1:

Energia emitida: 2,5 MeV;

Tempo de exposição: 180 s;

Espessura do concreto: 23 cm;

Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 44 cm;

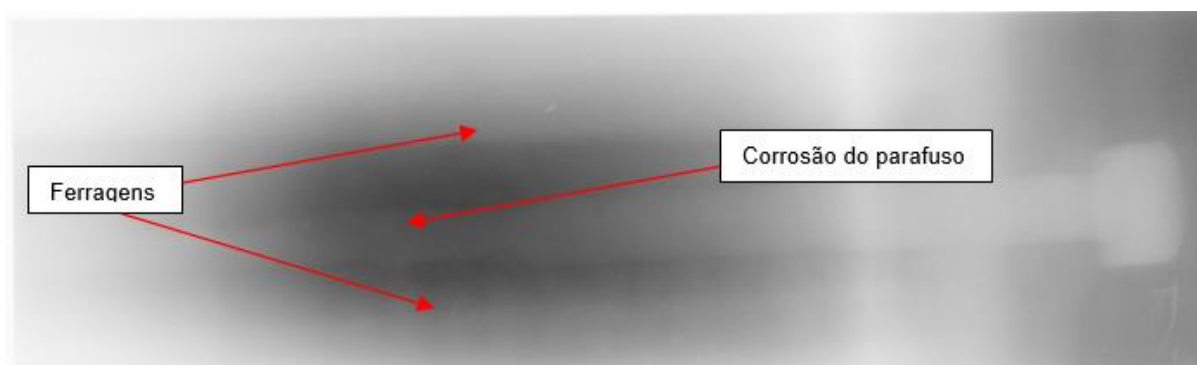
Distância entre o objeto e o detector IP: 14 cm.

Figura 5-32- Radiografia visualizada sem utilização de filtros matemáticos.



Abaixo a mesma imagem acima, com cor negativa, sem utilização de filtro.

Figura 5-33- Radiografia visualizada utilizando cor negativa sem utilização de filtros matemáticos.



Nesta radiografia é possível visualizar o parafuso e as ferragens existentes no bloco de concreto utilizado.

b) Critério Adotado Img-2:

Energia emitida: 5,0 MeV;

Tempo de exposição: 180 s;

Espessura do concreto: 23 cm;

Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 44 cm;

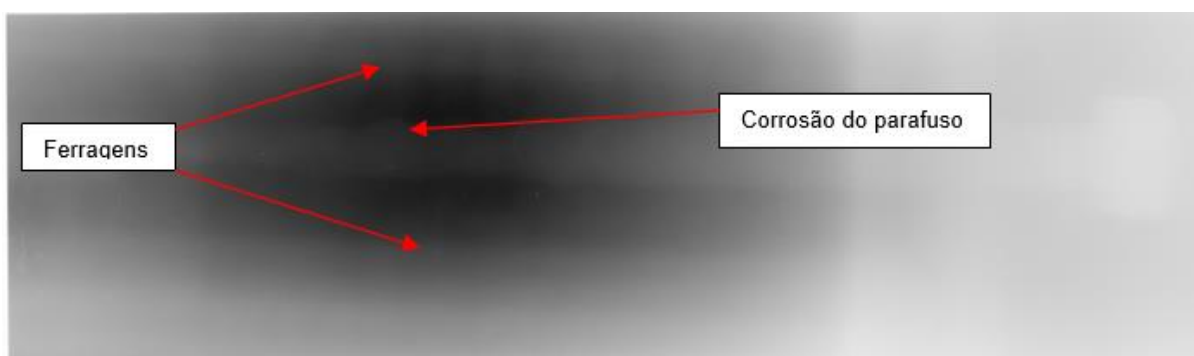
Distância entre o objeto e o detector IP: 14 cm.

Figura 5-34- Radiografia visualizada sem utilização de filtros matemáticos.



Abaixo a mesma imagem acima, com cor negativa, sem utilização de filtro.

Figura 5-35- Radiografia visualizada utilizando cor negativa sem utilização de filtros matemáticos.



Aumentou-se a energia emitida (MeV) com intuito de melhorar o contraste da imagem. Nesta radiografia é também possível visualizar o parafuso e as ferragens existentes no bloco de concreto utilizado, porém com melhor contraste e detalhamento que a imagem Img-1.

c) Critério Adotado Img-3:

Energia emitida: 7,0 MeV;

Tempo de exposição: 180 s;

Espessura do concreto: 23 cm;

Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 44 cm;

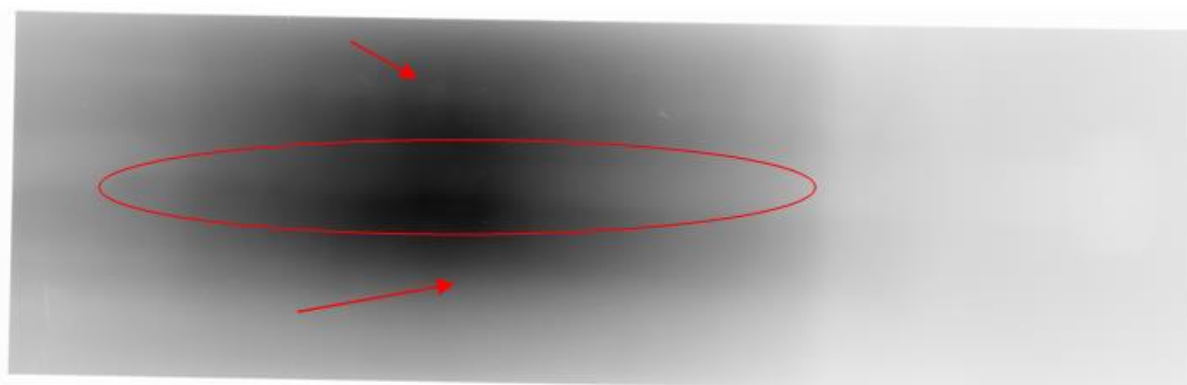
Distância entre o objeto e o detector IP: 14 cm.

Figura 5-36- Radiografia visualizada sem utilização de filtros matemáticos.



Abaixo a mesma imagem acima, com cor negativa, sem utilização de filtro.

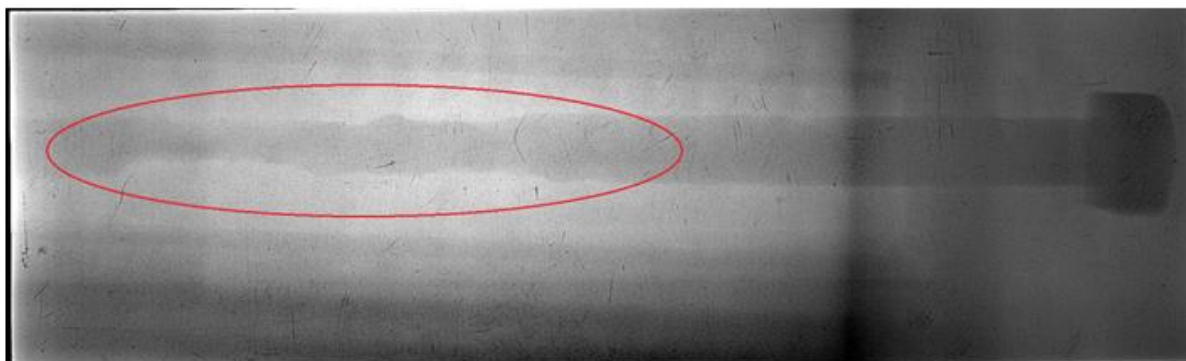
Figura 5-37- Radiografia visualizada utilizando cor negativa sem utilização de filtros matemáticos.



Nesta radiografia também foi possível visualizar o parafuso em círculo e as ferragens em setas existentes no bloco de concreto utilizado, no entanto, com qualidade inferior a imagem Img-2.

Mesmo com o parafuso a uma distância um pouco maior do filme, podemos ver que ele se projeta bem nas imagens, dando para ver a existência de corrosão pela radiografia. Escolhemos a imagem img-2 para realizar o processamento com filtros matemáticos (Filtro da Mediana e Filtro de Realce de Detalhes), porque foi a imagem que obtivemos melhor qualidade como segue a Figura 5-38.

Figura 5-38- Radiografia processada utilizando de filtros matemáticos: filtro da mediana e o filtro de realce de detalhes.



O círculo vermelho destaca a corrosão existente no parafuso, vista de forma mais nítida.



Foram realizados testes radiográficos utilizando 73 cm de concreto (uma estrutura de concreto com 50 cm de espessura e outro com 23 cm), com o objetivo de radiografar um parafuso de metal corroído colocado na cavidade do bloco. A distância entre a Fonte de Raios-X e o detector IP - Imaging Plate foi de 108 cm e a distância entre o parafuso para o Imaging Plate foi de 6 cm.

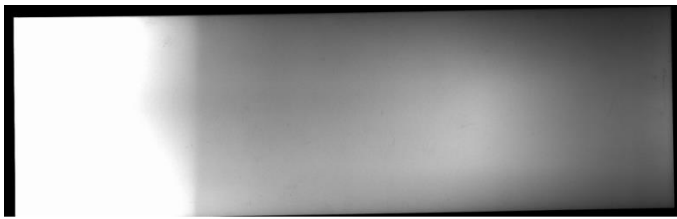
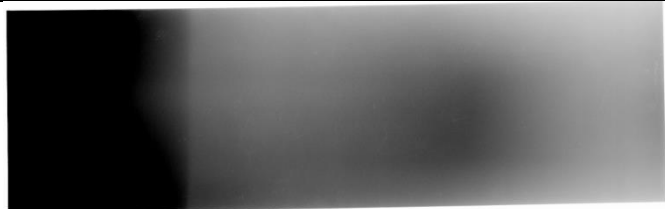



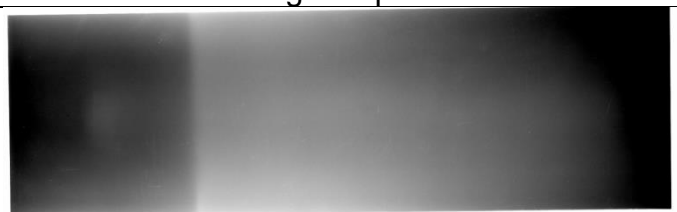
Segue na tabela abaixo os parâmetros utilizados:

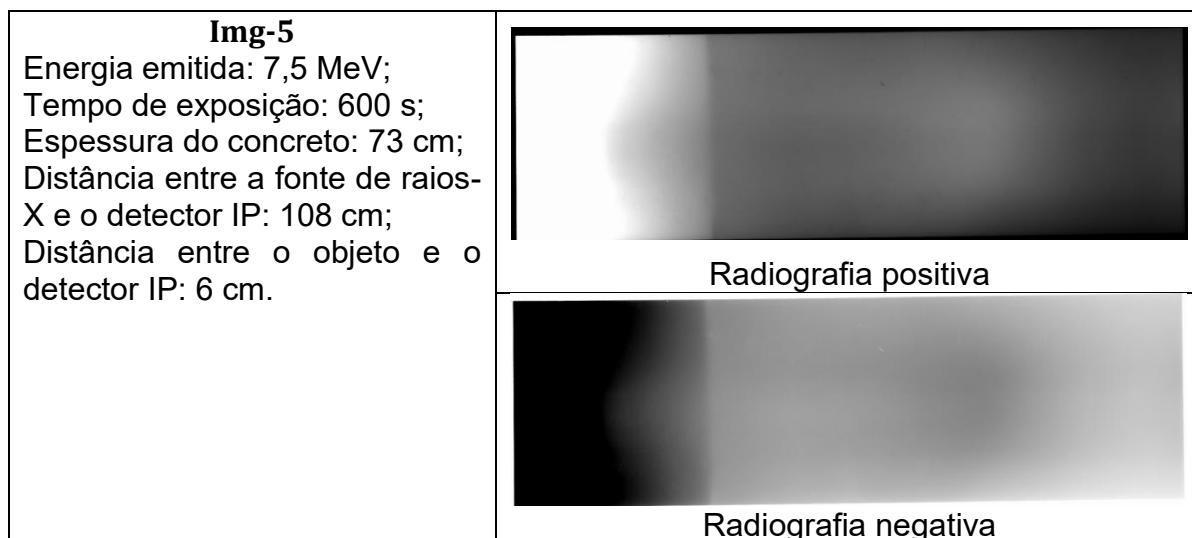
Tabela 5-16- Parâmetros de irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) |
|--------|---------------|-----------|
| Img-1 | 5,0 | 180 |
| Img-2 | 7,5 | 180 |
| Img-3 | 7,5 | 300 |
| Img-4 | 7,5 | 450 |
| Img-5 | 7,5 | 600 |

Figura 5-39- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|---|--|
| Img-1 Energia emitida: 5,0MeV; Tempo de exposição: 180 s; Espessura do concreto: 73 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 108 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 6 cm. |  <p>Radiografia positiva</p> |
| |  |

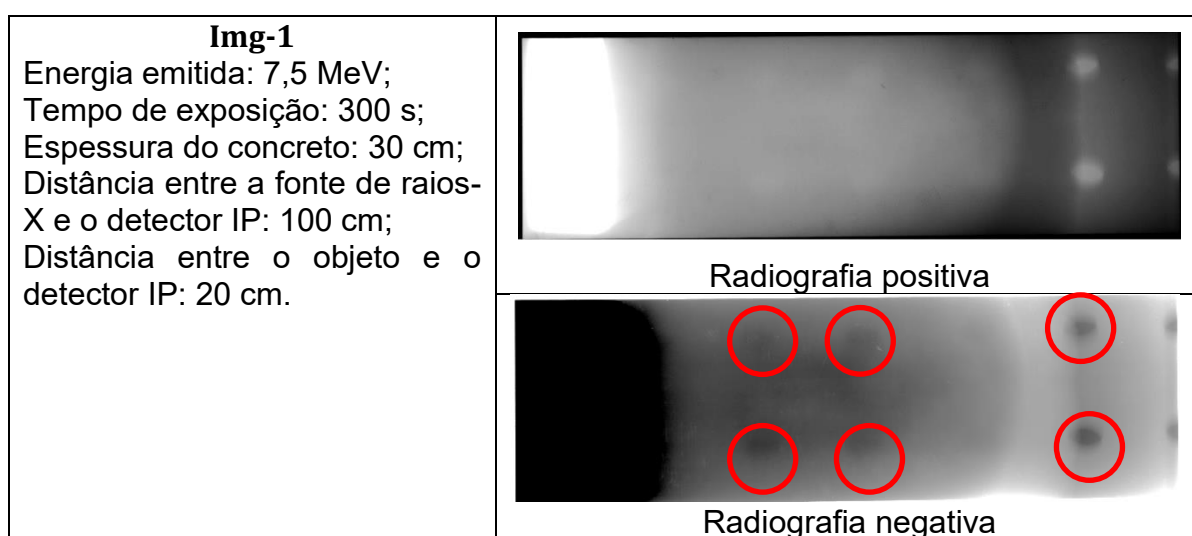
| | |
|--|--|
| | Radiografia negativa. |
| Img-2 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 180 s; Espessura do concreto: 73 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 108 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 6 cm. |  |
| | Radiografia positiva |
| |  |
| | Radiografia negativa |
| Img-3 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 300 s; Espessura do concreto: 73 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 108 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 6 cm. |  |
| | Radiografia positiva |
| |  |
| | Radiografia negativa |
| Img-4 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 450 s; Espessura do concreto: 73 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 108 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 6 cm. |  |
| | Radiografia positiva |
| |  |
| | Radiografia negativa |



Através das imagens radiográficas acima, o parafuso não apareceu nas imagens, pois os parâmetros utilizados não foram satisfatórios para obtenção de uma imagem ótima.

Visando radiografar a estrutura interna da fundação de concreto armado de uma torre metálica auto-portante, ensaios radiográficos foram realizados utilizando uma estrutura de concreto com 30 cm de espessura, contendo em seu meio uma parte faceada com a forma da uma cantoneira de metal com furos na sua estrutura, posicionado dentro dessa face à 20 cm de distância do filme. O nível de energia utilizado foi 7,5 MeV e o tempo de exposição 300s.


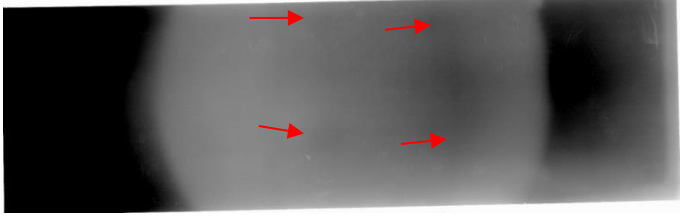
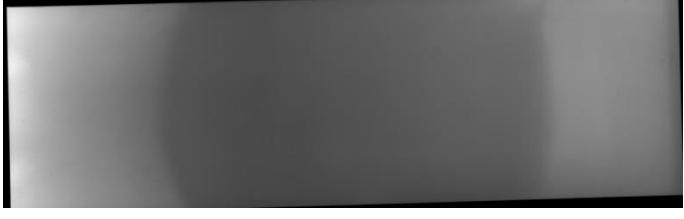

Figura 5-40- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente



Através das imagens acima é possível visualizar os furos existentes na peça que, os furos são mais bem vistos na imagem negativa.

Em outro teste foi adicionado um bloco de 30 cm na frente da cantoneira, para que o teste se aproxime da quantidade de concreto encontrado nas estruturas em campo. O nível de energia foi 7,5 MeV e o tempo de exposição 900s.

Figura 5-41- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

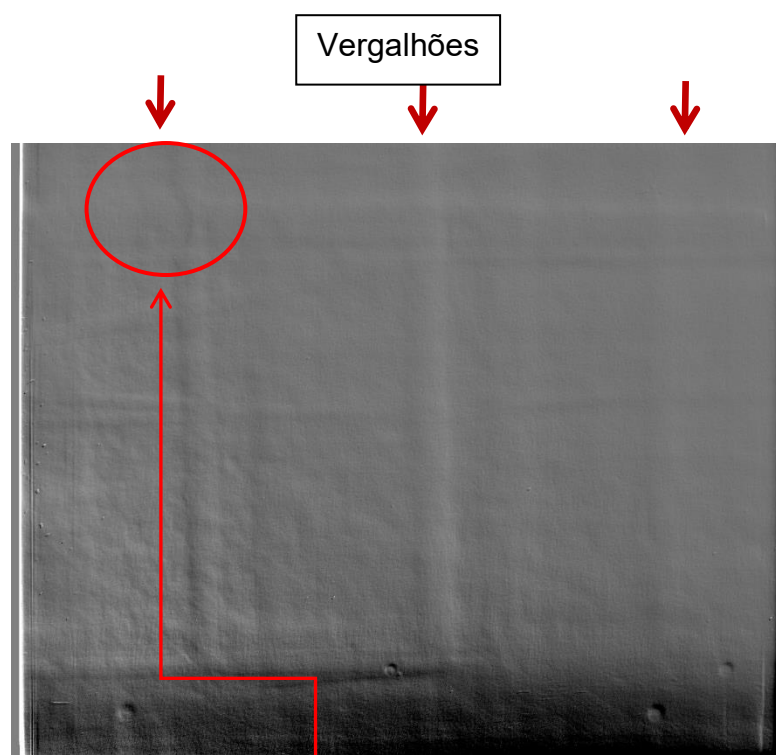
| | |
|---|---|
| <p>Img-1 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 900 s; Espessura do concreto: 60 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 20 cm.</p> |  <p>Radiografia positiva</p>  <p>Radiografia negativa</p> |
| <p>Img-2 Energia emitida: 7,5 MeV; Tempo de exposição: 1200 s; Espessura do concreto: 60 cm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm; Distância entre o objeto e o detector IP: 20 cm.</p> |  <p>Radiografia positiva</p>  <p>Radiografia negativa</p> |

Pelas imagens acima mostradas não foi possível obter uma imagem satisfatória para uma boa inspeção, pois os parâmetros utilizados não foram bons para obter uma boa imagem quando a espessura de concreto foi aumentada, com a menor espessura a estrutura foi mais bem visualizada.

5.3 Ensaios Radiográficos da Fundação de Concreto Armado de uma Torre Metálica Autoportante de Linha de Transmissão de 230 kV

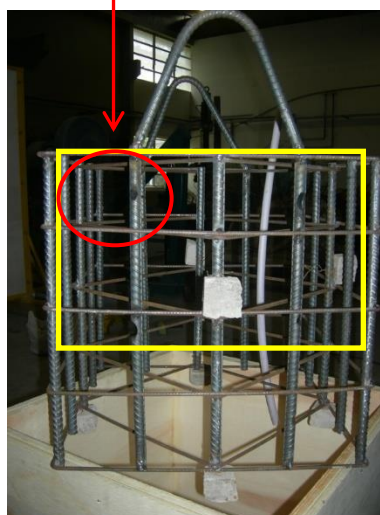
Foi realizada uma radiografia do bloco de concreto que representa a base da torre de linhas de transmissão contendo defeitos conforme a Figura 5-42.

Figura 5-42- Estrutura para concreto armado com defeitos gerados. Dimensão: 60 cm x 60 cm.



Processamento de imagem com "Pseudo Plast" X shift 21, Y Shift: 21, Grey value: 3000

Condições:
Energia: 7,5 MeV
Tempo: 2700 s
Imaging Plate: Alta
 resolução 35 cm x 43 cm



Neste ensaio foi utilizado os parâmetros com energia de 7,5 MeV, tempo de exposição de 40 min, distância fonte/filme de 1,2 m e filtros de cobre 0,89 mm e chumbo 5 mm de espessura, filme IP da Durr.

Imagens com filtro de cobre de 0,89 mm e de chumbo de 1 mm.

Figura 5-43- Radiografia como foi obtida.



Figura 5-44- Radiografia negativa da figura acima



A seguir, imagens processadas com filtro matemático Pseudo Plast.

Figura 5-45- Imagem radiográfica positiva processada com filtro Pseudo Plast.

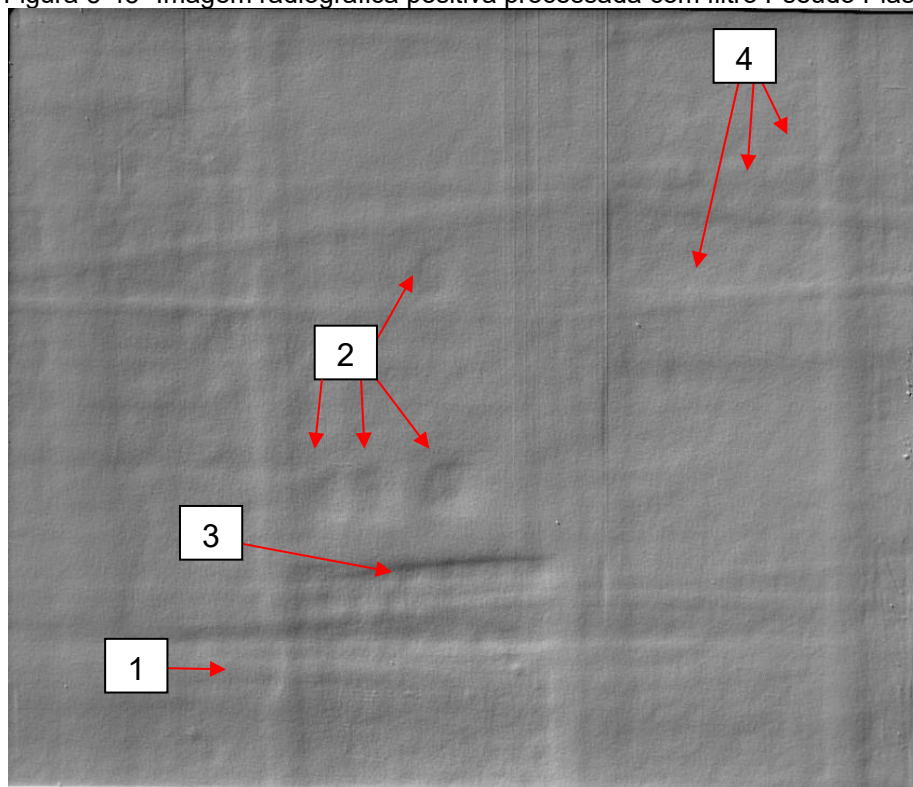
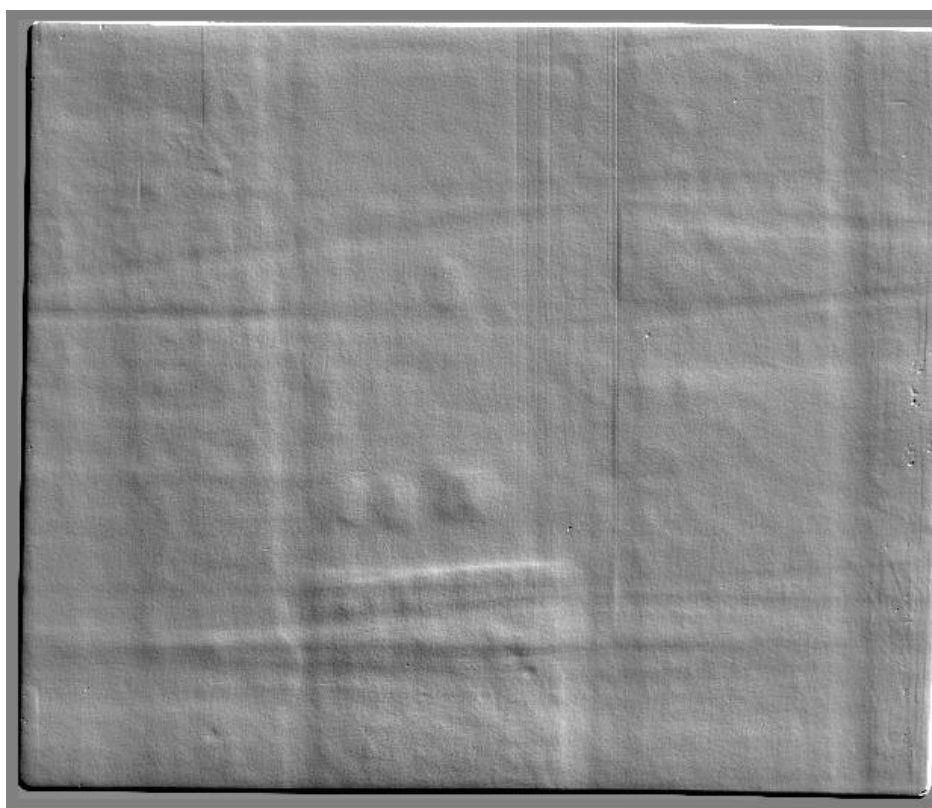


Figura 5-46- Imagem radiográfica negativa processada com filtro Pseudo Plast.



A seguir, imagens processadas com filtro matemático Adaptive Details Isotropic.

Figura 5-47- Imagem radiográfica positiva processada com filtro Adaptive Details Isotropic.

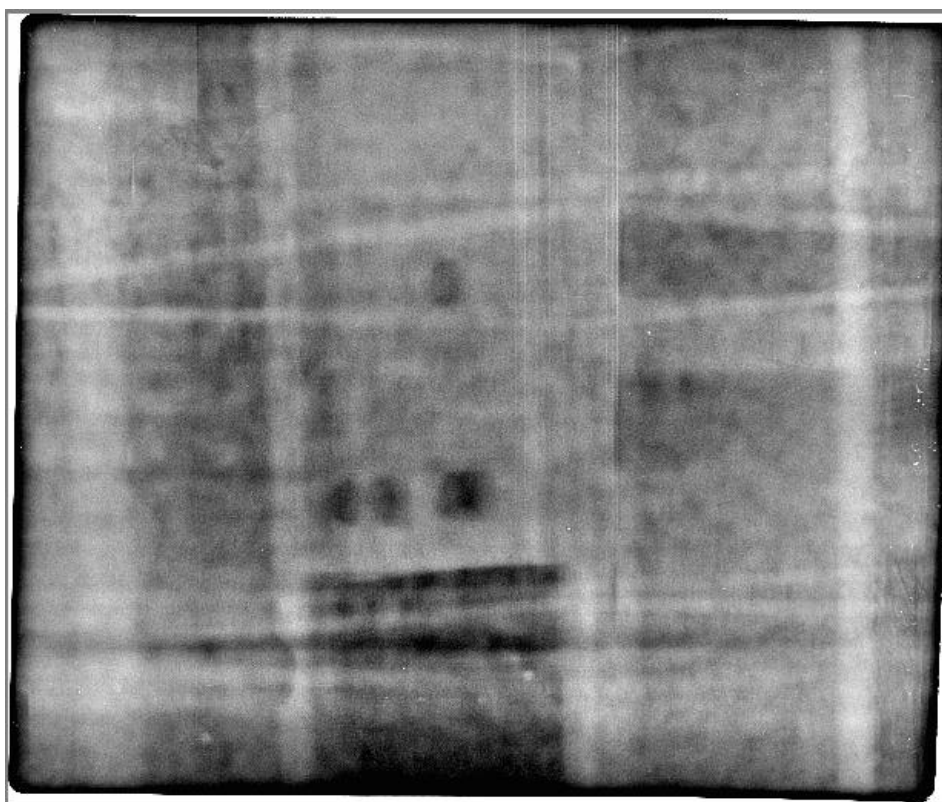
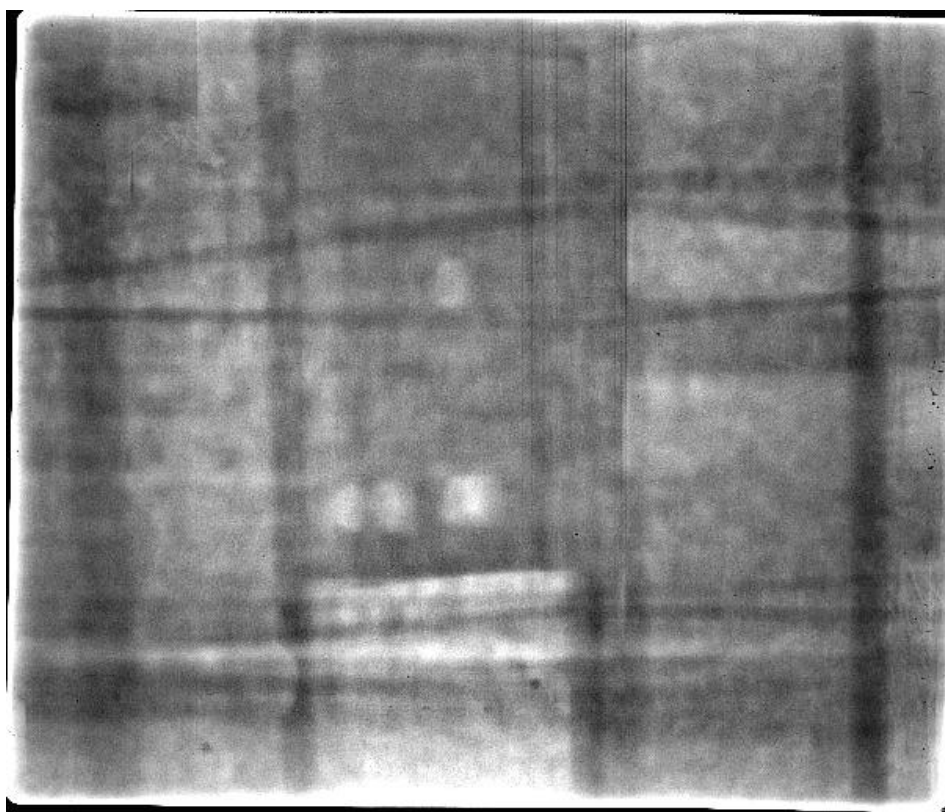


Figura 5-48- Imagem radiográfica negativa processada com filtro Adaptive Details Isotropic.



Com o método de utilização de filtros de cobre (frontal) e chumbo (posterior) para reduzir o efeito deletério do espalhamento de raios-X gerado no concreto armado sobre a qualidade de imagem radiográfica, possibilitou observar uma série de detalhes, tais como: (1) os reforços de aço com perda de massa dispostos verticalmente, (2) furos no stub, (3) vazios abaixo do stub, (4) estribos horizontais, os quais, usualmente, não é possível de observar.

Pesquisas em publicações encontradas em artigos mostram imagens radiográficas de reforços de aço, localizados a 15 mm e no máximo até 40 mm da parede externa, quando são radiografados utilizando raios-X de alta energia. Ressalta-se que o stub, localizado no centro do bloco de concreto de 30 cm a 35 cm do filme IP foi detectado. Até o momento, após exaustiva pesquisa em artigos, anais de congressos, etc., não foi encontrada imagem semelhante, fato que atesta o caráter inédito dessa pesquisa. Portanto, a metodologia desenvolvida gerou resultados que podem servir para indústria ou para o aprofundamento em outros trabalhos acadêmicos.

5.4 Inspeção dos Tirantes no Interior de uma Torre de Concreto de Linha de Transmissão de 500 kV – Testes Utilizando Imaging Plate de Diferentes Fabricantes Combinados com Filtros Físicos de Cobre e Chumbo

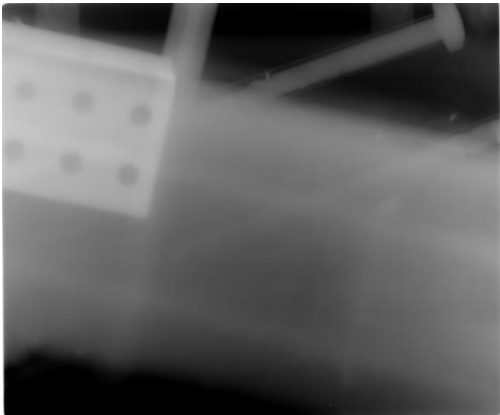
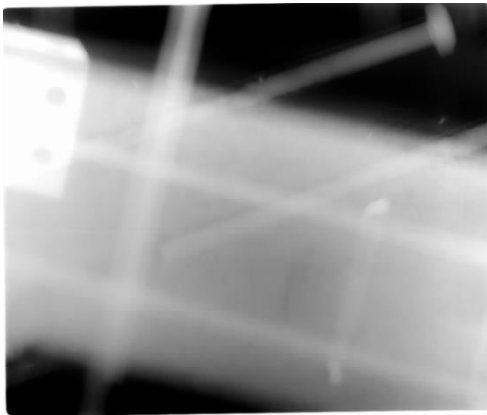
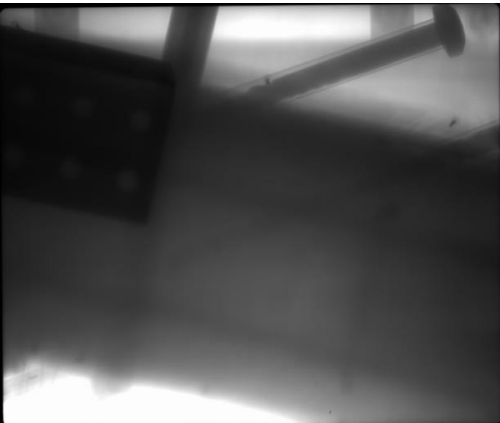

Nos ensaios foram utilizados os mesmos parâmetros radiográficos: Energia de 5,0 MeV, tempo de exposição de 600 s e distância da fonte de raios-X ao IP foi de 1 m, de acordo com esquema abaixo. Um ensaio com cada filme foi feito com e sem a utilização de filtros físicos: uma chapa de cobre de 0,89mm de espessura e uma chapa de chumbo de 1mm de espessura.

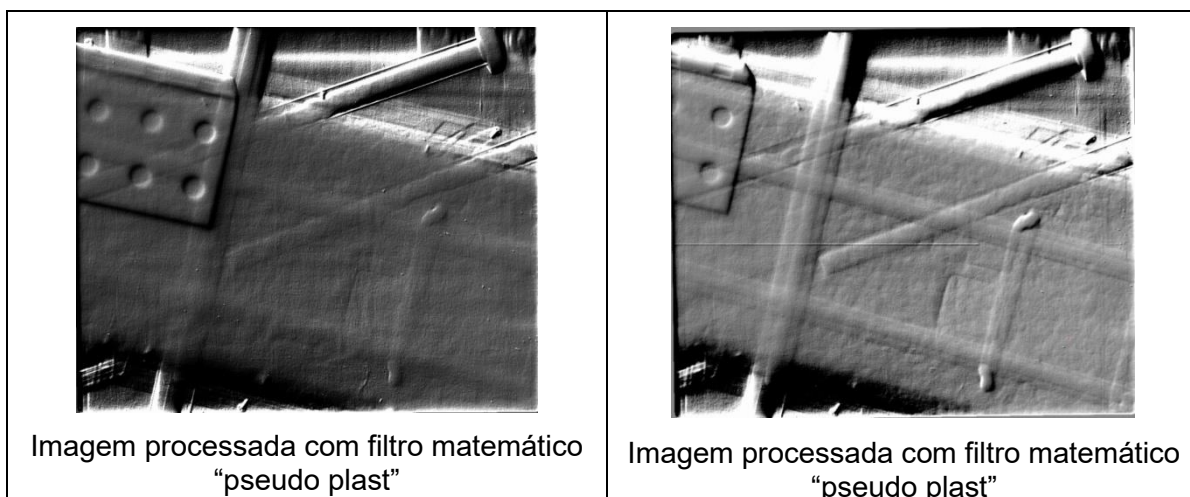
A seguir, os resultados as imagens radiográficas utilizando o filme da Durr 35 cm x 43 cm. Os parâmetros utilizando estão listados na Tabela a seguir e os resultados discutidos adiante.

Tabela 5-17- Parâmetros de irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) | Filtro |
|--------|---------------|-----------|--------|
| Img-1 | 5.0 | 600 | Sem |
| Img-2 | 5.0 | 600 | Com |

Figura 5-49- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| Img-1 | Img-2 |
|---|---|
| <p>Energia emitida: 5.0MeV; Tempo de exposição: 600 s; Material do filtro e espessura: Sem filtro; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm.</p> | <p>Energia emitida: 5.0MeV; Tempo de exposição: 600 s; Material do filtro e espessura: Com filtro de cobre de 0,89mm e de chumbo de 1mm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm.</p> |
|  <p>Radiografia positiva</p> |  <p>Radiografia positiva</p> |
|  <p>Radiografia negativa</p> |  <p>Radiografia negativa</p> |



Podemos observar que a utilização de filtros de cobre de 0,89 mm e de chumbo de 1 mm melhora a visualização dos materiais inseridos no concreto.


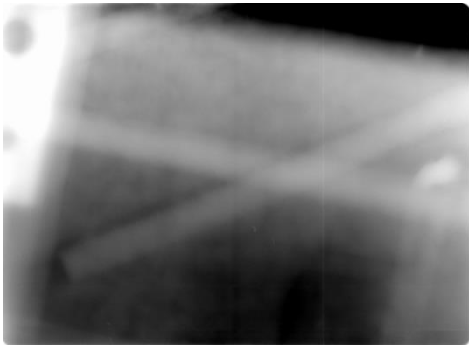
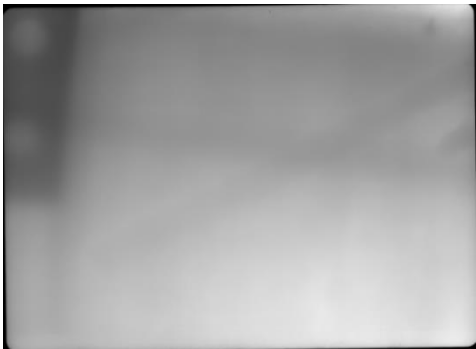
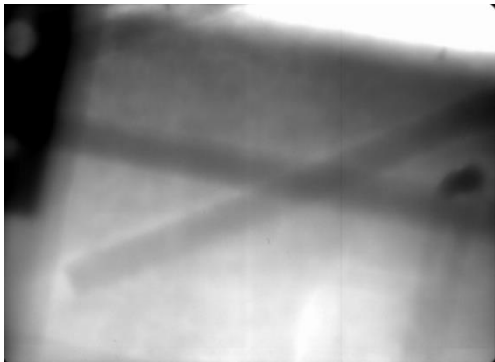
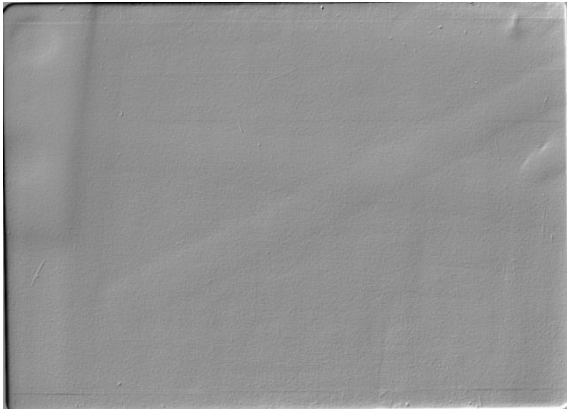
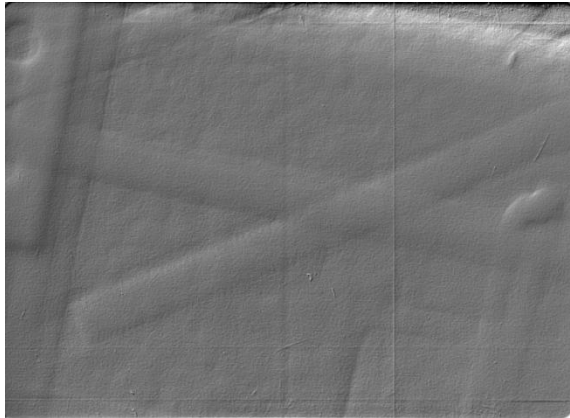
Segue abaixo as imagens radiográficas utilizando o filme da Fuji 18x24, com parâmetros listados na Tabela 5-19.

Tabela 5-18- Parâmetros da irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) | Filtro |
|--------|---------------|-----------|--------|
| Img-1 | 5.0 | 600 | Sem |
| Img-2 | 5.0 | 600 | Com |

Figura 5-50- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| Img-1 | Img-2 |
|--|--|
| Energia emitida: 5.0MeV; Tempo de exposição: 600 s; Material do filtro e espessura: Sem filtro; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. | Energia emitida: 5.0MeV; Tempo de exposição: 600 s; Material do filtro e espessura: Com filtro de cobre de 0,89 mm e de chumbo de 1 mm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |

| | |
|---|--|
|  |  |
| Radiografia positiva | Radiografia positiva |
|  |  |
| Radiografia negativa | Radiografia negativa |
|  |  |
| Imagem processada com filtro matemático "pseudo plast" | Imagem processada com filtro matemático "pseudo plast" |





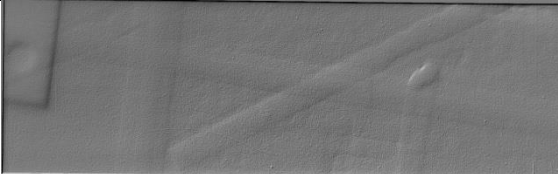
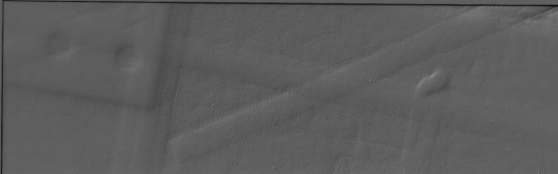
Podemos observar que a utilização de filtros de cobre de 0,89 mm e de chumbo de 1 mm melhora a visualização dos materiais inseridos no concreto.

Segue abaixo as imagens radiográficas utilizando o filme da Perkin-Elmer 12,5 cm x 43 cm. Os parâmetros utilizando estão listados na Tabela a seguir e os resultados discutidos posteriormente.

Tabela 5-19- Parâmetros da irradiação.

| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) | Filtro |
|--------|---------------|-----------|--------|
| Img-1 | 5,0 | 600 | Sem |
| Img-2 | 5,0 | 600 | Com |

Figura 5-51- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| Img-1 | Img-2 |
|--|--|
| Energia emitida: 5.0MeV; Tempo de exposição: 600 s; Material do filtro e espessura: Sem filtro; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. | Energia emitida: 5.0MeV; Tempo de exposição: 600 s; Material do filtro e espessura: Com Filtro de cobre de 0,89 mm e de chumbo de 1 mm; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. |
|  Radiografia positiva |  Radiografia positiva |
|  Radiografia negativa |  Radiografia negativa |
|  Imagem processada com filtro matemático "pseudo plast" |  Imagem processada com filtro matemático "pseudo plast" |

Podemos observar que a utilização de filtros de cobre de 0,89 mm e de chumbo de 1 mm melhora a visualização dos materiais inseridos no concreto.

Nota-se que, em função do fabricante de Imaging Plate, a qualidade de imagem varia. Pelas imagens obtidas nos ensaios utilizando diferentes filmes com e sem utilização de filtros, vimos que a técnica utilizando filtro físico de cobre de 0,89 mm e de chumbo de 1 mm e posteriormente processada com filtro matemático Pseudo Plast utilizando o filme do fabricante Durr formaram as imagens com melhor qualidade para o experimento como pode-se observar a seguir.

Figura 5-52- Imaging Plate da Durr de 35 cm x 43 cm.

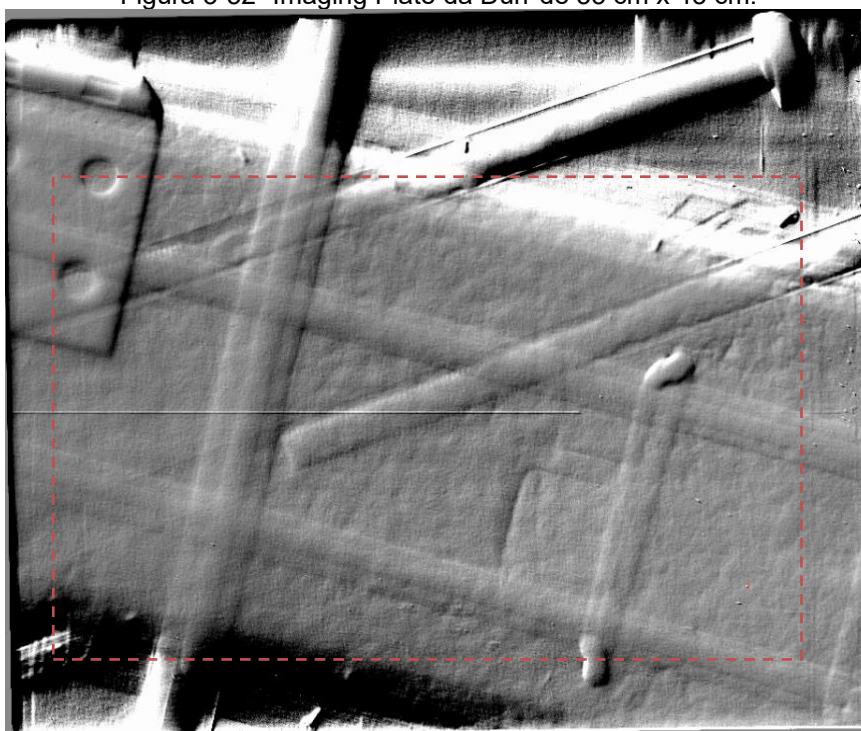


Figura 5-53- Imaging Plate da Fujifilm de 18 cm x 24 cm.

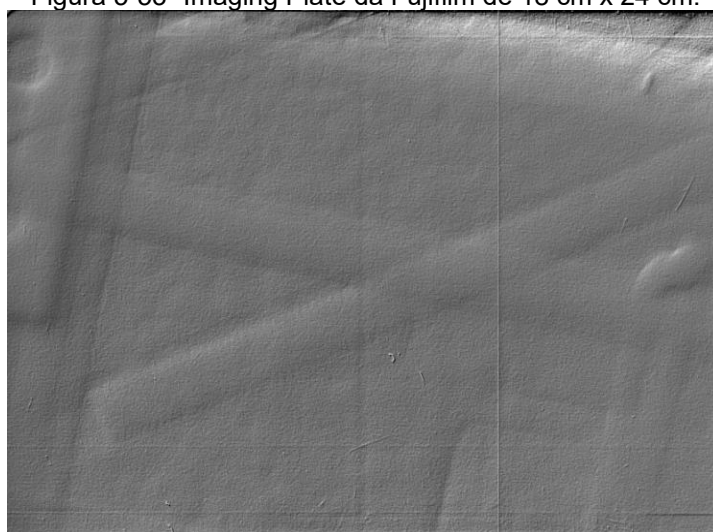
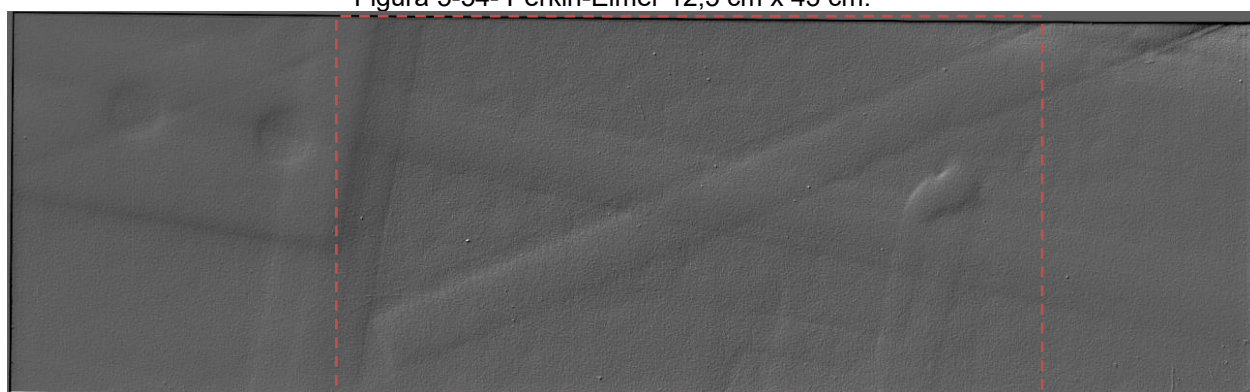


Figura 5-54- Perkin-Elmer 12,5 cm x 43 cm.



5.5 Inspeção dos Tirantes no Interior de uma Torre de Concreto de Linha de Transmissão de 500 kV

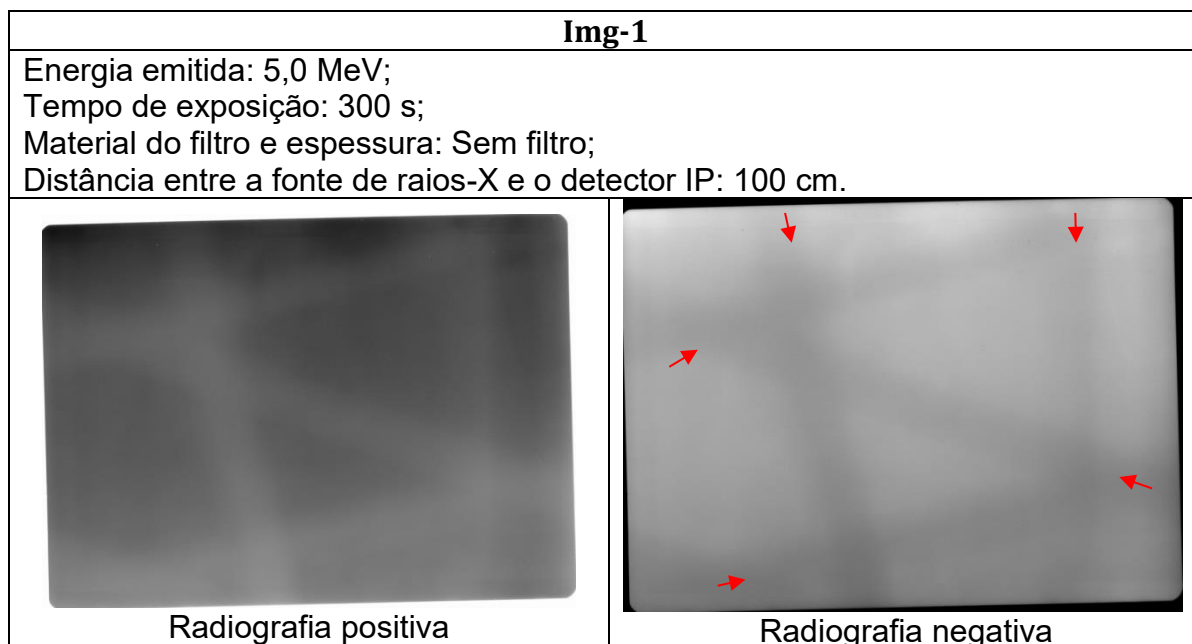
A estrutura representando um tirante de torre de linha de transmissão, com dois parafusos corroídos, colocados no lugar que corresponde ao tirante inclinado de sustentação da cruzeta foi feito na UFPE para realização de radiografia.

A distância entre o bloco e a fonte de raios-X foi de 75 cm, entre a fonte e o filme colocado atrás do bloco é de 1m, como mostra o esquema abaixo. Os parâmetros utilizados estão listados na tabela a seguir e os resultados discutidos posteriormente.

Tabela 5-20- Parâmetros de irradiação.

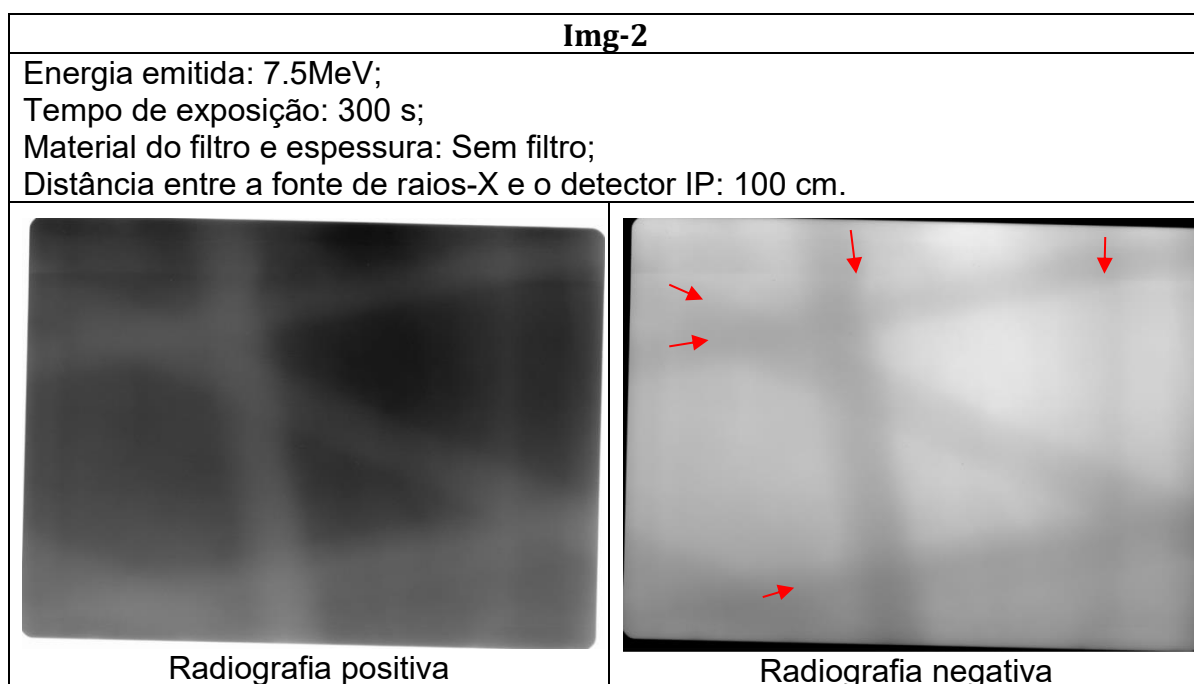
| Imagem | Energia (MeV) | Tempo (s) | Filtro |
|--------|---------------|-----------|----------------|
| Img-1 | 5.0 | 300 | Sem |
| Img-2 | 7.5 | 300 | Sem |
| Img-3 | 5.0 | 300 | Cobre - 0.89mm |
| Img-4 | 7.5 | 300 | Cobre - 0.89mm |
| Img-5 | 7.5 | 600 | Cobre - 0.89mm |
| Img-6 | 2.5 | 600 | Sem |
| Img-7 | 7.5 | 60 | Sem |

Figura 5-55- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente



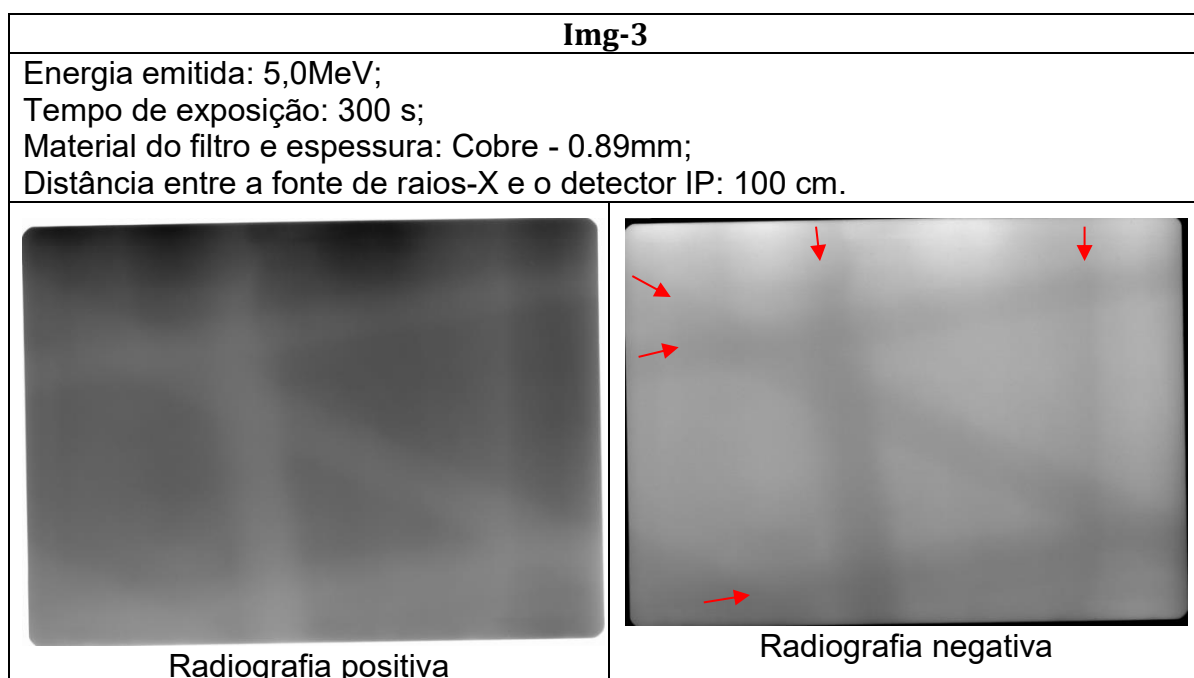
Nesta radiografia acima é possível visualizar a estrutura interna apontada ao longo das setas vermelhas, mas com pouca qualidade.

Figura 5-56- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente



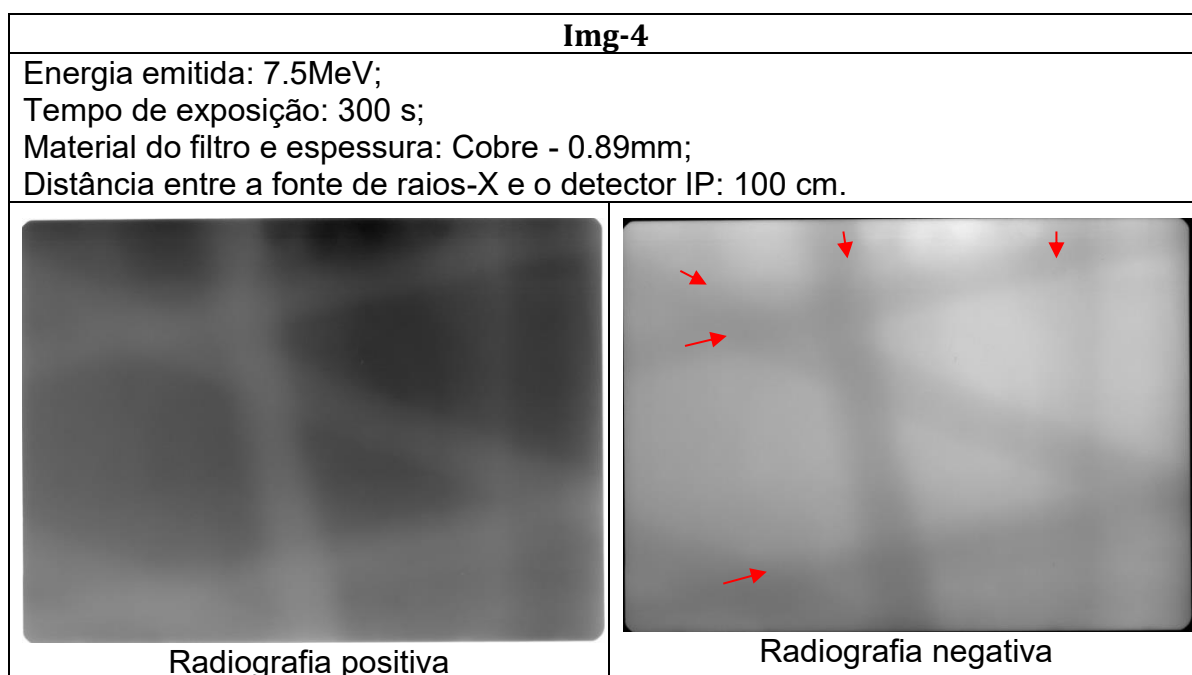
Nesta radiografia acima, a visualização das estruturas, indicadas ao longo das setas, ficaram com mais nitidez que a Img-1.

Figura 5-57- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente



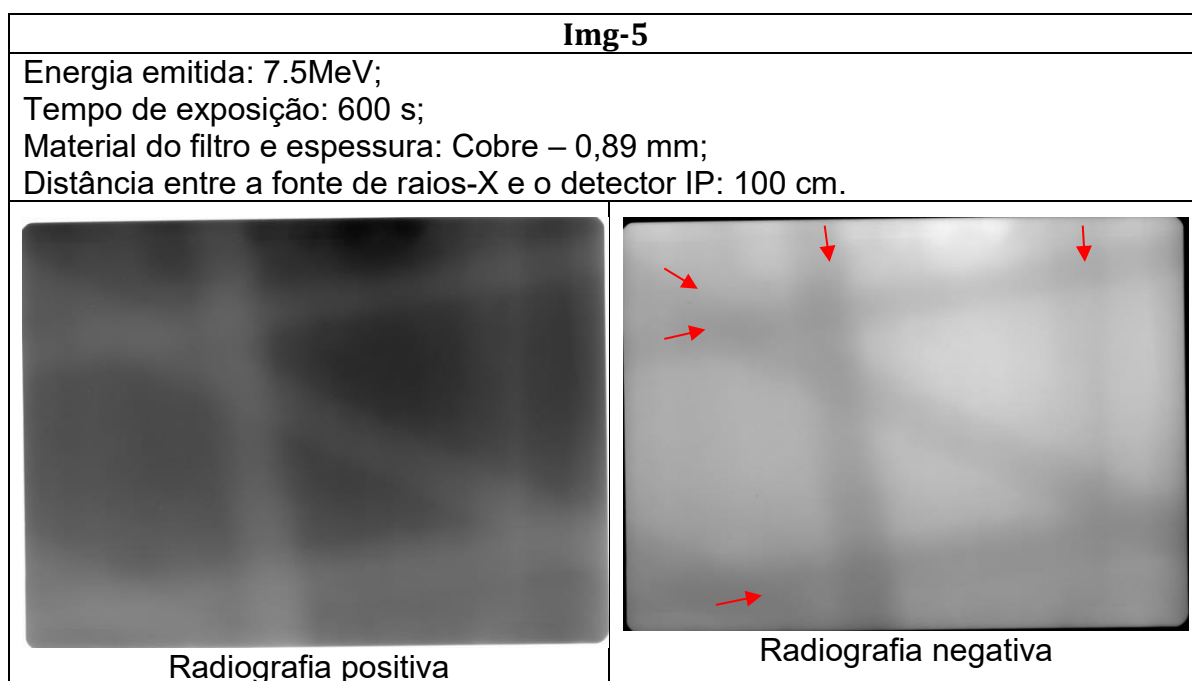
Para esse parâmetro escolhido acima, a utilização do filtro de cobre não tornou a imagem com melhor qualidade que as imagens anteriores Img-1 e Img-2 sem o filtro.

Figura 5-58- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente



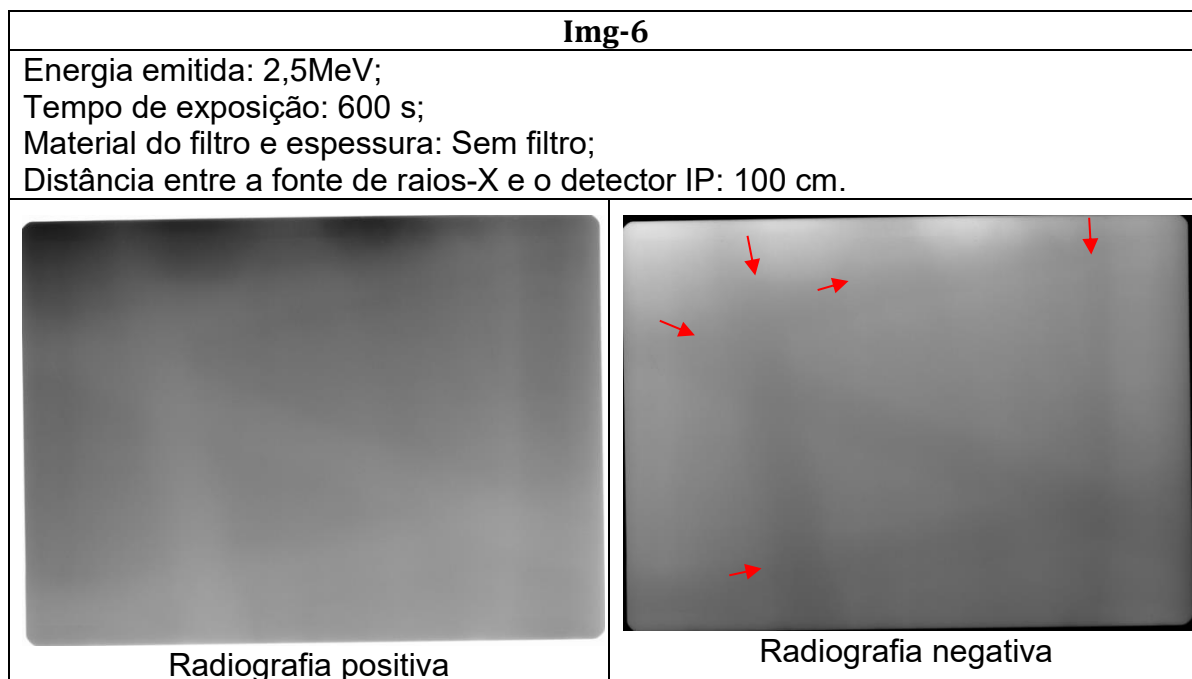
Nas imagens deste ensaio acima é possível visualizar as estruturas internas do tirante, porém ainda com menos qualidade que as imagens sem utilização de filtro de cobre.

Figura 5-59- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente



Com mais tempo de exposição a imagem acima se mostrou com melhor qualidade entre as que foram utilizado filtro de cobre, mas ainda está com menos nitidez que as imagens sem o filtro.

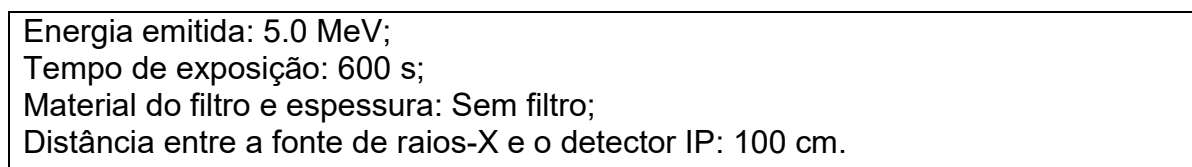
Figura 5-60- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

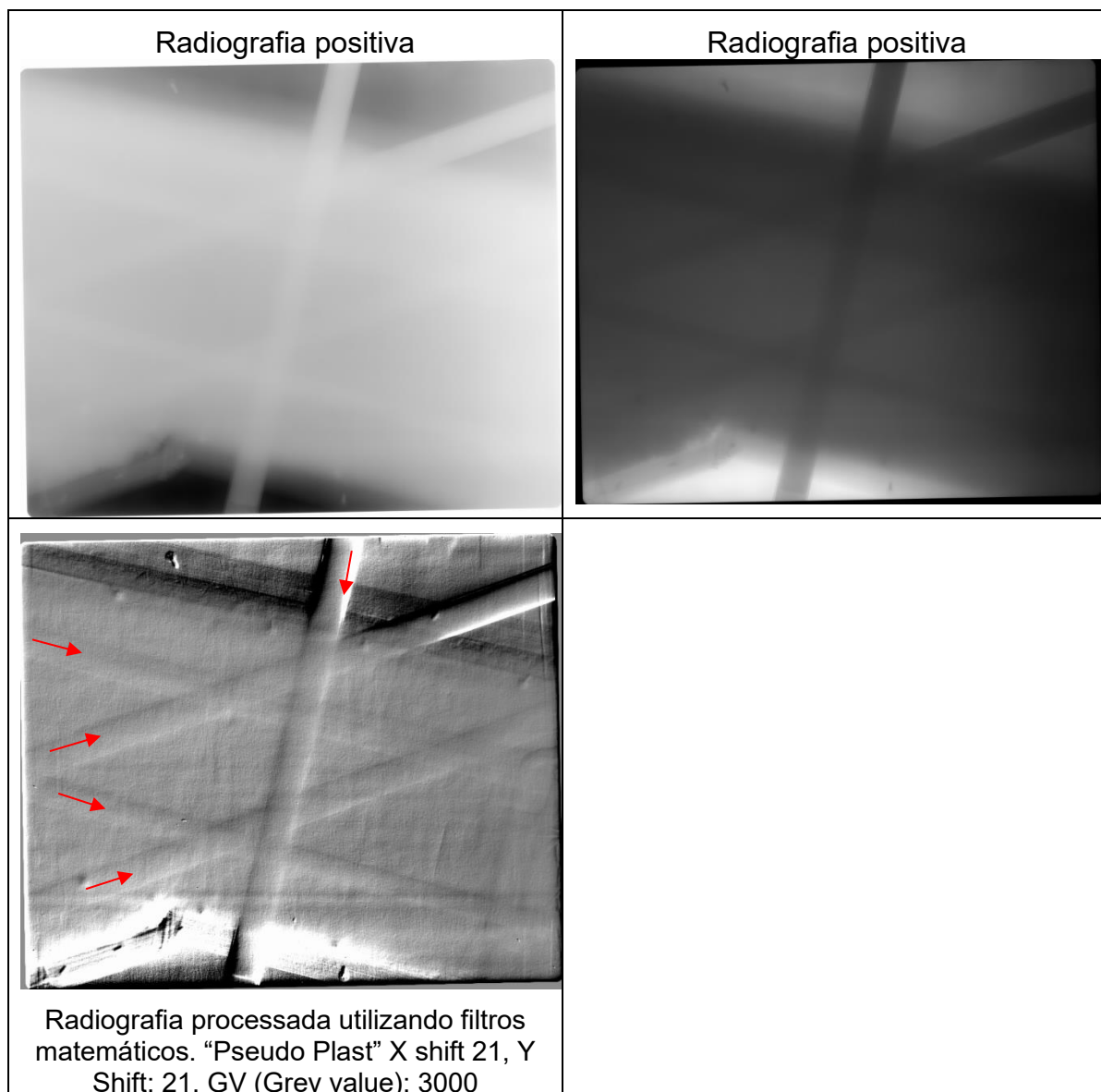


As imagens acima mostram que a utilização da energia de 2.5 MeV não foi ideal para formar uma imagem útil.

Ensaio foram realizados utilizando a mesma extremidade do tirante de sustentação da cruzeta da estrutura HB-AR de 500 kV. Utilizou-se nível de energia de 5,0 MeV, tempo de exposição de 600s e não se utilizou filtros.

Figura 5-61- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

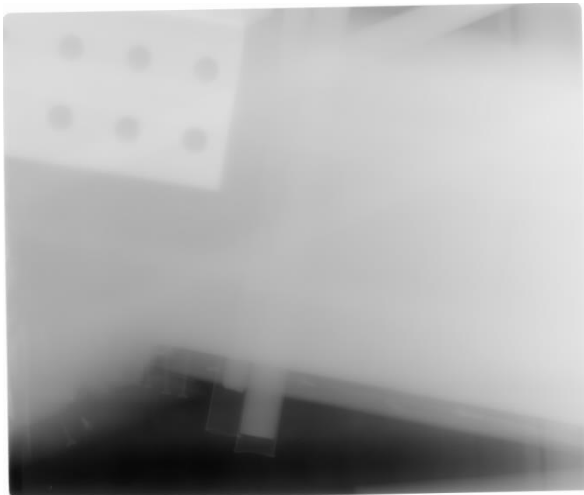
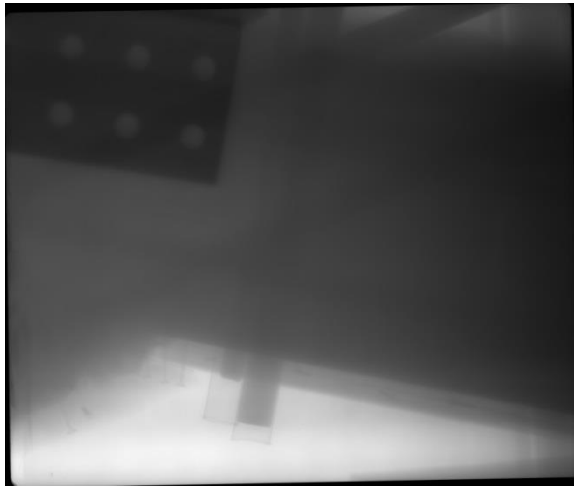
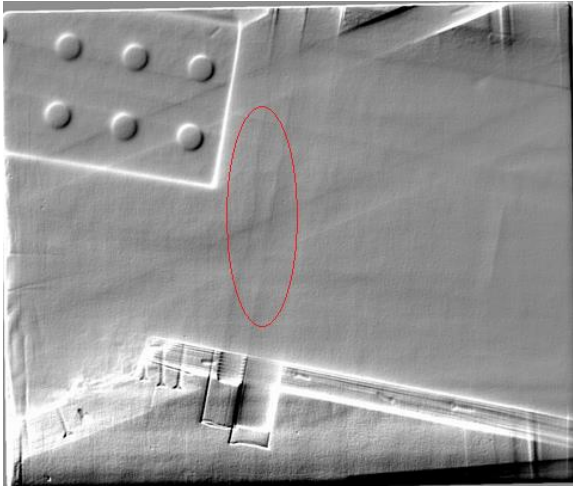




Através das imagens acima, em destaque, a imagem processada é possível visualizar bem a estrutura interna da cruzeta e inspecionar com uma boa qualidade de imagem.

No lugar da barra de aço da parte posterior, foi introduzido um parafuso com alto grau de corrosão onde foi realizado um teste para saber se pela radiografia seria possível inspecioná-lo. Além de ter dado uma pequena inclinação no bloco para evitar sobreposição entre a barra anterior e o parafuso, já que ambos estavam na mesma linha de visão. A distância entre a fonte e o filme foi de 1 m.

Figura 5-62- Parâmetros utilizados com imagem obtida correspondente

| | |
|--|--|
| Energia emitida: 5,0 MeV; Tempo de exposição: 600 s; Material do filtro e espessura: Sem filtro; Distância entre a fonte de raios-X e o detector IP: 100 cm. | |
|  <p>Radiografia positiva sem processamento</p> |  <p>Radiografia positiva sem processamento</p> |
|  <p>Radiografia processada utilizando filtros matemáticos "Pseudo Plast" X shift 21, Y Shift: 21, GV (Grey value): 3000</p> | |

Pela imagem acima é possível visualizar o defeito no parafuso relacionado à perda de massa, em destaque. Isso permite realizar uma boa inspeção do tirante de aço no interior da cruzeta de concreto armado.

Através das imagens obtidas e processadas, é possível realizar a inspeção do interior da cruzeta com alta qualidade. O sistema de radiografia de alta energia com betatron utilizando a energia de 5 MeV de pico, tempo de 600 s e distância entre fonte

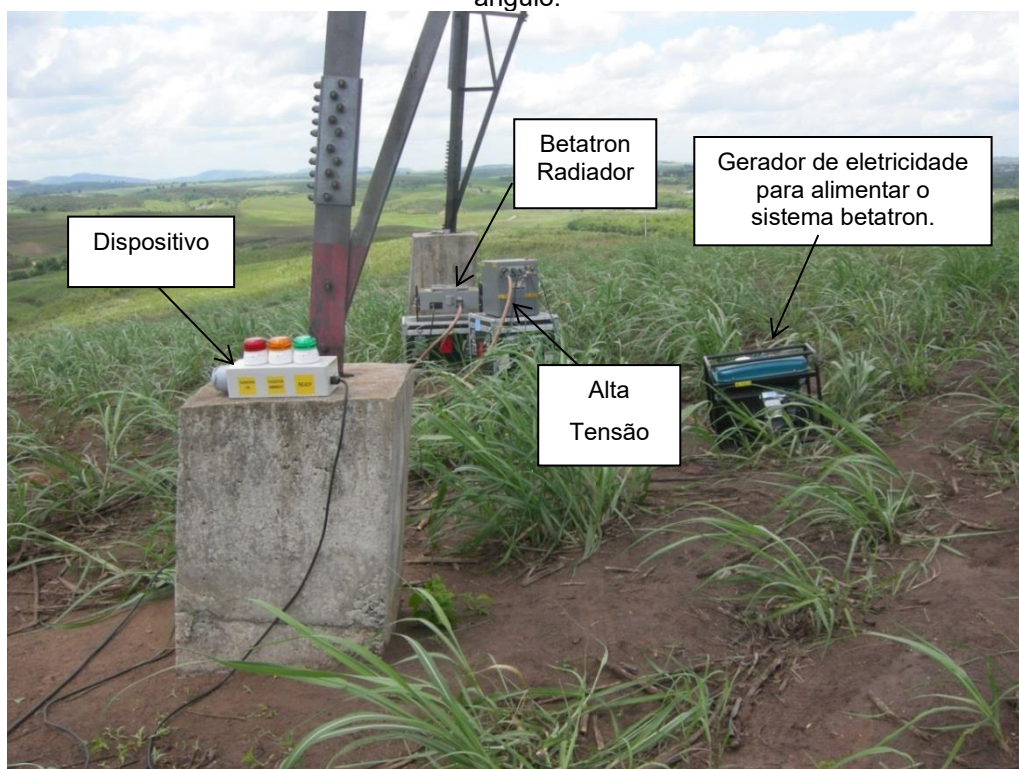
ao Imaging Plate de 1 m são excelentes parâmetros radiográficos para inspecionar interior da cruzeta de concreto armado.

5.6 Testes em Campo com Sistema Radiográfico Digital de Alta Energia para Validar os Parâmetros Radiográficos Obtidos no Laboratório

5.6.1. Fundação de Concreto Armado da Torre de 230kV da linha Campina Grande/Pau Ferro

O primeiro teste em campo visando validar os parâmetros radiográficos com o sistema de radiografia digital de alta energia para radiografar as ferragens de aço de uma estrutura de concreto armado de fundação de torre metálica autoportante de secção quadrada de 70 cm foi realizado na torre de 230 kV da linha Campina Grande II/Pau Ferro. A Figura 5-63 mostra o sistema radiográfico posicionado para radiografar a fundação.

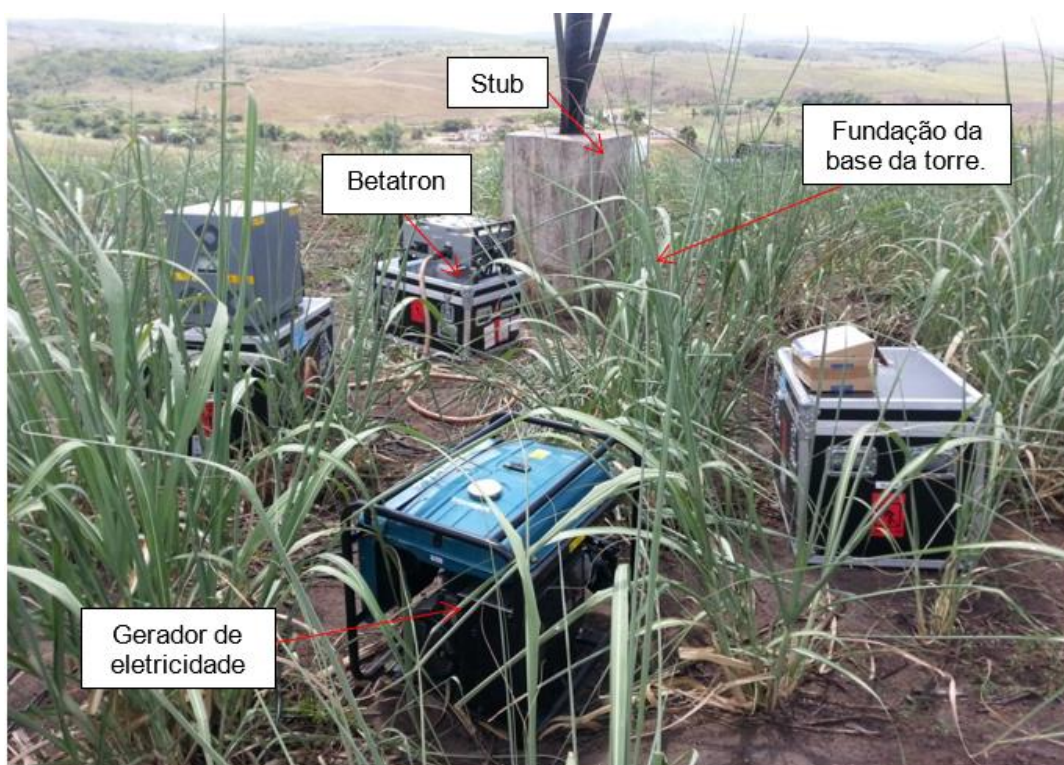
Figura 5-63- Montagem para procedimento do sistema de radiografia digital de alta energia por outro ângulo.



Foi utilizado o gerador de eletricidade de 4.2 kVA. Embora os sinais iniciais indicassem operação normal do betatron e o gerador utilizado tivesse a potência requerida para suportar 2,4 kW de consumo pelo sistema de betatron, problemas operacionais com o gerador não permitiram realizar os ensaios.

Um novo teste em campo para radiografar a fundação da base torre 31-2 Pau Ferro em Campina Grande foi realizado utilizando o gerador de eletricidade de potência maior de 5,1 kVA.

Figura 5-64- Esquema adotado para radiografia da fundação da base da Torre 31-2 Pau Ferro em Campina Grande.



O Imaging Plate foi posicionado do outro lado da fundação da base da torre, posicionado no local a ser inspecionado conforme a Figura 5-65.

Figura 5-65- Posicionamento do Imaging Plate.



Figura 5-66- Dispositivo sobreposto à outra fundação da base da mesma torre.



Figura 5-67- Dispositivo.



Figura 5-68- Leitor de Imaging Plate.



Figura 5-69- Workstation para armazenamento de dados.



Neste dia não foi possível obter imagem radiográfica devido ao não funcionamento do sistema radiográfico.

Nos dois testes em campo que foram realizados utilizando gerador de potências diferentes não teve sucesso em radiografar as fundações da torre de 230 kV.

5.6.2. Almoxarifado da CHESF em Abreu e Lima

Em outro momento, foi realizado um novo ensaio com objetivo de radiografar parafusos na cruzeta de concreto no almoxarifado da CHESF em Abreu e Lima.

Figura 5-70- Disposição do sistema radiográfico.



Figura 5-71- Dispositivo para acionamento da fonte de raios-X e o detector geiger.



Figura 5-72- Dispositivo.



Figura 5-73- Gerador de eletricidade com potência máxima de 5.1 kVA.



Como no primeiro teste em campo anterior foi verificado que o gerador de eletricidade à gasolina não estava conseguindo alimentar o betatron de forma satisfatória, então, neste dia, utilizou-se um gerador de eletricidade de maior potência (potência máxima de 5.1 kVA).

Mesmo utilizando um gerador de eletricidade de maior potência, não foi possível obter imagens radiográficas em função da baixa intensidade de raios-X, apesar de constar no manual de utilização do Betatron que indicava o consumo de 2,4 kW, não conseguindo suportar a carga solicitada pelo sistema de raios-X Betatron. O leitor de IP funcionou.

Durante os testes em campo notou-se inicialmente que o raios-X de 7,5 MeV gerado não estava atravessando os concretos armados nem com a espessura de 200 mm, e muito menos de 600 mm de espessura. O problema de baixa intensidade de raios-X emitido pela fonte de raios-X betatron foi comunicado ao fabricante JME/UK. Embora o gerador de eletricidade seja 4,2 kVA de fabricação Makita, modelo EG512A e outro de 5,1 kVA tenham sido utilizados, o fabricante JME recomendou o uso de um gerador de pelo menos 12 kVA. Ademais, o fabricante recomendou o uso de um grupo gerador específico que possua um motor a diesel de três cilindros e que a eletricidade gerada possua onda senoidal real. O insucesso de radiografar em campo utilizando os dois geradores de eletricidade à gasolina de 4,2 kVA e 5,1 kVA, é atribuído à falta de potência e qualidade de energia adequada, ausência de onda senoidal real.

Novos testes no campo não foram realizados porque o projeto P&D ANEEL foi encerrado e a concessionária resolveu recolher o betatron, não permitindo realizar testes adicionais em campo.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

No presente estudo, foi realizado um trabalho intensivo de pesquisa e desenvolvimento de um sistema de radiografia computadorizada empregando uma fonte de raios-X de alta energia de 2,0 MeV até 7,5 MeV a partir de acelerador de elétrons denominado de betatron, e detector radiográfico de alta sensibilidade e alta resolução denominado de Imaging Plate (IP) visando inspecionar e monitorar descontinuidades nos tirantes de aço no interior de torres de concreto armado, utilizados para dar rigidez à estrutura de torres de concreto de linhas de transmissão de 500 kV, para avaliar a sua integridade estrutural. Os testes radiográficos com o sistema de radiografia computadorizada de alta energia foram realizados em laboratório e também em campo.

Inicialmente, os testes radiográficos foram para avaliar o poder de penetração dos feixes de raios-X de alta energia no concreto sem armadura utilizando blocos de concreto de espessura variando de 200 mm até 1.500 mm. Com o sistema radiográfico computadorizado com raios-X de 7,5 MeV foi demonstrado o poder de penetração em espessura de 1.500 mm de concreto sem a utilização de filtros físicos. Os ensaios realizados em laboratório com corpos de prova foram cruciais para avaliar a penetração dos feixes de raios-X de alta energia e para a definição de parâmetros radiográficos ótimos.

Para a avaliação do sistema radiográfico computadorizado de alta energia desenvolvido, o IQI de fios duplos (ASTM E2597 e EN 462-5) foi utilizado. Através das imagens radiográficas obtidas e analisadas, o IQI de fios duplos com o filtro de cobre de 0,89 mm apresentou a melhor resolução espacial.

Uma das vantagens da radiografia computadorizada é a possibilidade de processamento de imagens digitais visando realçar regiões de interesse (ROI), o que não é possível ser realizado com técnicas convencionais de inspeção de concreto armado. O processamento da imagem digital empregando filtros matemáticos do software dedicado ISee! do BAM permitiu realçar a borda e melhor visualização das descontinuidades nos tirantes de aço devido à corrosão, de vergalhões do concreto armado simulando perda de massa e de espaços vazios no interior do concreto

armado. Observou-se que a análise detalhada das regiões de interesse (ROI) foi substancialmente aprimorada pela combinação dos filtros físicos de cobre e chumbo com o processamento digital de imagens evidenciando a criticidade dessas técnicas para a precisão diagnóstica.

A realização de experimentos com o sistema de radiografia computadorizada de alta energia com detectores Imaging Plate (IP) demonstrou a potencialidade de obter imagens radiográficas de alta qualidade e resolução, proporcionando uma compreensão da integridade estrutural dos tirantes, stub, ferragens de aços, auxiliando na definição dos parâmetros radiográficos otimizados para inspeção e monitoramento dessas estruturas no campo.

Notou-se que a qualidade da imagem radiográfica depende do fabricante de Imaging Plate. Nos ensaios experimentais realizados, utilizando diferentes Imaging Plates com e sem utilização de filtros físicos, verificou-se que o uso do filtro físico de cobre de 0,89 mm na frente do detector Imaging Plate da empresa Durr, e de chumbo de 1 mm posterior ao Imaging Plate, e a imagem radiográfica processada posteriormente com filtro matemático “Pseudo Plast” do ISEE!, possibilitou obter imagens radiográficas de melhor qualidade.

Do ponto de vista da proteção radiológica para realizar ensaios no campo, um plano de proteção radiológica adequado é de fundamental importância para garantir a segurança dos operadores e do meio ambiente.

O presente trabalho de pesquisa demonstrou a viabilidade técnica da utilização combinada de uma fonte de raios-X de alta energia a partir de um acelerador de elétron denominado de betatron (2,0 MeV a 7,5 MeV), detector de alta sensibilidade e resolução denominado de Imaging Plate (IP) de 350 mm X 430 mm, tipo azul da Durr e de escâner HD-CR35 da Durr, para inspecionar a integridade estrutural dos tirantes, stub, ferragens e armaduras de aço de concreto armado utilizados em linhas de transmissão, proporcionando uma metodologia eficaz para a inspeção preventiva, garantia de segurança e confiabilidade dessas estruturas críticas.

Com respeito aos ensaios radiográficos no campo, os testes iniciais com o sistema de radiografia de alta energia desenvolvido no presente trabalho não tiveram sucesso porque somente o uso do grupo gerador de eletricidade à gasolina de 5 kVA, embora tivesse a potência suficiente, não conseguiu fornecer energia de qualidade mínima requerida pela fonte de raios-X de alta energia betatron para operar

adequadamente. Para solucionar a questão, entre o grupo gerador e a fonte de raios-X betatron, o uso de um nobreak de 10 kVA de dupla-conversão é fundamental.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em termos de sugestões para trabalhos futuros:

1) Realizar os ensaios radiográficos com raios-X de alta energia no campo com os parâmetros radiográficos determinados nos testes laboratoriais utilizando um nobreak de 10 kVA acoplado a um grupo gerador de eletricidade visando:

- Realizar ensaios radiográficos em estruturas de fundações de concreto armado autoportante das torres metálicas;

- Realizar ensaios radiográficos dos tirantes no interior da torre de concreto armado de linha de transmissão de 500 kV energizada, visando avaliar a sua integridade estrutural sem a necessidade de realizar a desmontagem.

2) O processamento de imagens radiográficas digitais com filtros matemáticos adequados mostrou uma enorme potencialidade de realçar e auxiliar na detecção de descontinuidades em estruturas de concreto armado estudados no presente trabalho revelando detalhes no seu interior. Portanto, é de fundamental importância dar continuidade a um estudo sistemático de processamento de imagem digital de radiografia, em especial imagens radiográficas digitais obtidas com raios-X de alta energia de betatron.

3) Realizar simulação numérica sobre espalhamento de raios-X no concreto armado em função de sua dimensão pelo método de Monte Carlo, usando software comercial CIVA-RT com o objetivo de avaliar o grau de espalhamento e comparar com os resultados experimentais.

4) Estabelecer um laboratório especializado em radiografia industrial de alta energia para dar suporte às indústrias locais tais como do setor elétrico e construção civil.

5) Com advento do “Machine Learning” cada vez mais acessível, incorporar e testar o uso da inteligência artificial (IA) poderá auxiliar sobremaneira na análise e interpretação das imagens radiográficas a serem obtidas, e também na elaboração dos procedimentos de realização da inspeção radiográfica, assim como na elaboração de um plano de proteção radiológica adequada.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6118:2003, “*Projeto de estruturas de concreto – procedimento*”. 2004. 221 p.

ACI Report 228.2R-98, “*Non-Destructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*”. 2004.

ALMEIDA, S.P.S. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, mar. 2004.

AMEMIYA, Y.; MIYAHARA, J. **Imaging plate illuminates many fields**. Nature Publishing Group, 3 de novembro de 1988, vol. 336, pp. 89-90.

AUDITORE, L.; BARNA, R. C.; EMANUELE, U.; LOÓRIA, A.; TRIMARCHI, M. **X-ray tomography system for industrial applications**. Nuclear D.; Instruments and Methods in Physics Research, B 266, p. 2138-2141, 2008.

ASTM E2007-10 (Reapproved 2023), *Standard Guide for Computed Radiography*, Abril, 2025.

ASTM E2002-22, *Standard Practice for Determining Total Image Unsharpness and Basic Spatial Resolution in Radiography and Radioscopy*, Abril, 2025.

ASTM E3388-23, *Standard Practice for Determining Image Unsharpness and Basic Spatial Resolution in Radiography and Radioscopy for High Energy Applications*, Abril, 2025.

“Betatron”. **Banco de Dados Folha, 1952**. Disponível em: <
http://almanaque.folha.uol.com.br/ci%EAncia_24fev1952.htm>. Visto em: 20 de abril de 2019.

“Betatron”. **Wikipédia**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Betatron>>. Visto em: 13 de junho de 2019.

BRONNIKOV, AV. KILLIAN, D. **Cone-beam tomography system used for non-destructive evaluation of critical components in power generation**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 422 (1999) 909-913, KEMA, Nederland, PI: 5 0168 - 9002 (98) 01042 – 0.

BURGER, W.; BURGE, M.J. **Principles of digital image processing-fundamental techniques**. Undergraduate topics in computer science. Ed. Springer, 2009. 261p.

BURNHAM, J.T.; WAIDELICH, R.J. **Gunshot damage to ceramic and nonceramic insulators**. IEEE Transactions on Power Delivery, Florida, v. 12, n. 4, October 1997.

BUYUKOZTURK, O. **Imaging of Concrete Structures**. NDT&E International, Vol. 31, No. 4, pp. 233-243, 1998.

CANDEIAS, A.L.B.; BARROS, J.E.N.; WAVRIK, J.F.A.G.; SHINOHARA, A.H. **Coloured synthetic enhancement of image edge obtained with X-ray imaging for structural integrity inspection**. In: *IEEE 2019 International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, 17-19/09/2019, Pullmann Kuala Lumpur City Center, Kuala Lumpur, Malaysia.

CHEN, R.; LOCKWOOD, D. J. **Developments in luminescence and display materials over the last 100 years as reflected in electrochemical society publications**. *J. Electrochem. Soc.*, 149 (9) pp. S69-S78, 2002.

CNEN N.N.6.04 - (Res. 145/13). *Requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de radiografia industrial*. (Res. 145/13), *Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Radiografia Industrial*.

CNEN N.N.3.01, *Diretrizes básicas de radioproteção*. Rio de Janeiro, 2005.

CNEN N.N.5.01 NN 5.04, *Transporte de materiais radioativos*, (Res. 148/13) *Rastreamento de Veículos de Transporte de Materiais Radioativos*. Rio de Janeiro, 1988.

CNEN N.N.3.03, *Certificados de qualificação de supervisores de radioproteção*.

CNEN N.N.6.02, Res 112/11, *Licenciamento de instalações radiativas*.

CNEN N.E.3.02, *Serviços de radioproteção*. Rio de Janeiro, 1988.

COELHO, J.A. **Processo de aquisição de imagens em tomografia computadorizada para reconstrução 3-D do aparelho renal**. CEFET Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

DAILY, M. **Hue-saturation-intensity split-spectrum processing of Seasat radar imagery, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Vol. 49, No. 3, pp. 349-355, 1983.

DIAS, C.S.B.; BELTRAMINI, G.C.; RADICCHI, L.A.; GOTO, R.E. **Reconstrução de imagem na tomografia de transmissão**. Departamento de Matebática Aplicada. IMECC UNICAMP, Set. 2005.

DEROBERT, X.; AUBAGNAC, C.; ABRAHAM, O. **Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy**. NDT & E International, Vol. 35, 541 p., 2002.

DOVE, E.L. **Notes on computerized tomography**. Bioimaging Fundamentals, Physics of Medical Imaging, dez. 2001.

Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Visto em: 13 de junho de 2019.

ESQUEF, I.A.; ALBUQUERQUE, M.P. **Processamento digital de imagens**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, p. 12, 2003.

EWERT, U. **Current Trends in Digital Industrial Radiography: From Nano to Macro Scale**. Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), 2017. Pp 312-317.

EWERT, U. **Upheaval in industrial radiology**, 2002. Disponível em <<http://www.ndt.net/article/ecndt02/414/414.htm>>. Acesso em: 27 fev. 2015.

EWERT, U. **New Trends in Industrial Radiography**, NDT.net, vol. 7, n. 2, fev. 2002, pp. 1-5.

EWERT, U.; ZSCHERPEL, U.; BAVENDIEK, K. **Replacement of film radiography by digital techniques and enhancement of image quality**. 2006.

FALCÃO, A.X.; LEITE, N.J. **Fundamentos de processamento de imagem digital**. Apostila do Curso de Tópicos em Processamento de Imagens. IC, Unicamp, São Paulo, 2000.

FERREIRA, T.V. **Estudo do trilhamento de núcleo em isoladores poliméricos**. Dissertação de mestrado apresentado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

FLISCH, A. WIRTH, J.; ZANINI, R.; BREITENSTEIN, M., RUDIN, A. WENDT, F.; MNICH, F.; GOLZ, R. **Computerized tomography for industrial applications and image processing in radiology**, DG/ZfP-Proceedings BB 67-CD Paper 8, Berlin, Germany, Mar. 1999.

FORRESTER, J.A. **Gamma radiography of structural concrete**. 1960.

Fuji Photo Film Co Ltd., Tokyo, disponível em <<http://www.fujifilm.com>>, 2007.

FUJIWARA, H.; XAVIER, G.J.V.; SILVA JÚNIOR, E.J.; SHINOHARA, A.H.; COSTA, E.G.; LOTT NETO, H.B.D.T.; BRITTO, P.R.R.; FONTAN, M.A.B. **Ensaio experimental sobre efeito combinado do campo elétrico e da ionização do ar pelo raios-X em torno do isolador de polimérico de 500 kV sob tensão elétrica de até 640 kV.** *In: The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2017), Mar del Plata , Argentina.*

GILBOY, W.B.; JENNESON, P.M.; SIMONS, S.J.R.; STANLEY, S.J.; RHODES, D. **Muon radiography of large industrial structures.** *Nuclear Instruments and Methods.* Physic Research B 263 Elsevier. 2007, pp. 317-319.

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Digital image processing.** Second Edition, Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey, 2001. ISBN 0-201-18075-8.

HACKAM, R. **Outdoor HV composite polymeric insulators.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 6, n. 5, Oct. 1999.

HALL, J.F. **History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 1, Jan. 1993.

HALMASHAW, R. **Industrial radiology – theory and practice.** Non-destructive Evaluation – series, Second edition, Chapman&Hall, 1995.

HUMPHRIES, S. Jr. **Principles of Charged Particle Acceleration.** [S.I.]: John Wiley and Sons. 1999.

IAEA, *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety.* Series 115, Viena, 1996.

IAEA-International Atomic Energy Agency. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Training Course Series No. 17, Viena, 2002. ISSN 1018-5518.

ICRP-26, *Recomendations of the international comission on radiological protection.* 1977.

ICRP-35, *General principles of monitoring for radiation protection of workers*. 1982.

ICRP 51, *Data for Use in Protection Against External Radiation*.

Iowa State University (s.d.). Half-Value Layer, **NSF – National Science Foundation**. Disponível em <<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/HalfValueLayer.htm>>. Visto em: 10 abr. 2019.

JACOBS, P.; SEVENSA, E.; KUNNENBA, M. **Principles of computerised X-ray tomography and applications to building materials**. Belgium, 1995.

JAHNE, B. **Digital image processing**. Springer, 2002. ISBN 3-540-67754-2.

JAENISCH, G.; EWERT, U.; JECHOW, M. **Scatter Radiation in Radiography**. Federal Institute for Materials Research and Testing, Berlin, Germany. Disponível em: <https://idspektr.ru/10_ECNDT/reports/1_04_09.pdf>. Visto em: 12 jun. 2025.

JOHANSEN, G.A. **Nuclear tomography methods in industry**. Nuclear Physics, 2005. Doi: 10.1016/j.nuclphysa.2005.02.069.

Jornal Folha da Manhã. São Paulo, 26 de Janeiro de 1949, 1º caderno, pag.3.

KAK, A.C.; SLANEY, M. **Principles of computerized tomographic Imaging Society of industrial and applied mathematics**. School of Electrical Engineering Purdue University, 2001.

KAYRALAPOV, D.; ZHONG, Y.; BATRANIN, A.; CHAKHLOV, S. **Betatron radiography and tomography of steel castings with large thickness**. MATEC Web of Conferences 158, 01016 (2018). VI International Forum for Young Scientists “Space Engineering 2018”. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/6fde/0f027a88bc7fec7ea59decbf87aac4e333cf.pdf?>

_ga=2.33996456.849660050.1559186535-614120560.1553436434. Visto em:
31/05/2019.

KELLER, W.J.; PESSIKI, S. **Experimental Validation of a Numerical Model for Simulating Radiographic Imaging of Portland Cement-Based Materials. Journal of Nondestructive Evaluation.** Springer Science+Business Media New York. September 2015. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-015-0291-y>)

KERST, D. W. (1940). **Acceleration of Electrons by Magnetic Induction.** Physical Review. 58 (9). 841 pag.

KERST, D.W. (1941). **The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction.** Physical Review. 60. 47 pag.

KERST, D.W. (1941). **The Acceleration of Electrons by Magnetic Induction.** Physical Review. 60. 47 pag.

KLASENS, H.A. **Measurement and calculation of unsharpness combinations in X-ray photography.** Philips Research Reports. Livraria Editora Largo da Carioca, No.4, August 1946.

KLINGHOFFER, O.; KRISTENSEN, A.; JOVALL, O.; RYDÉN, N. **Condition assessment of concrete structures at nuclear power plants by state of the art non-destructive testing.** EPJ Web of Conferences, Vol. 12, 2011, p. 03002.

KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement.** Ed. John Wiley & Sons, Inc. 4th ed. 2010. ISBN: 978-0-470-13148-0 (hardback).

KOLKOORI, S.; WROBEL, N.; HOHENDORF, S.; EWERT, U. **High energy X-ray imaging technology for the detection of dangerous materials in air freight containers.** 2015 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST) (2015): 1-6.

KORNER, M.; WEBER, C.H.; WIRTH, S.; PFEIFER, K.J.; REISER, M.F.; TREITL, M. **Advances in digital radiography: physical principles and system overview**. Radiographics, 2007.

KRAUSE, M.; MAIERHOFER, C.; WIGGENHAUSER, H.; BARMANN, O.; LANGENBERG, K.; FRIELINGHAUS, R.; NEISECKE, J.; WOLLBOLD, F.; SCHICKERT, M. **Comparison of Pulse-Echo-Methods for Testing Concrete**. NDT.net, Vol. 1, 1996, No. 10, (<http://www.ndt.net/article/concrete/concrete.htm>).

KUMOSA, M.; KUMOSA, L.; ARMENTROUT, D. **Failure analyses of nonceramic insulators: part II – the brittle fracture model and failure preventio**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 21, n. 3, may/june 2005.

LABEGALINI, P.R.; LABEGALINI, J.A.; FUCHS, R.D.; ALMEIDA, M.T. **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. 2ª Edição - 1992. 1ª Reimpressão – 2005. Editora Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1992.

LALAGUE, A.; LEBENS, M.A.; HOFF, I.; GROV, E. **Detection of Rockfall on a tunnel concrete lining with ground-penetrating radar (GPR)**. Rock Mech Rock Eng. (2016) 49:2811-2823. DOI 10.1007/s00603-016-093-y.

LANÇA, L.; SILVA, A. **Digital radiography detectors – a technical overwire: part 1**. Radiography, v. 15, Issue 1, pg. 58-62, Feb. 2009. ISSN: 1078-8174.

LEBLANS, P.; VANDENBROUCKE, D.; WILLEMS, P. **Storage phosphors for medical imaging**. *Materials*, 4, pp. 1034-1086, 2011.

MACKEV, J.; SHAH, M. **Polymer outdoor insulating materials part I: comparison of porcelain and polyner electrical insulation**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 13, n. 3, may 1997.

MASTER, R.C. **Nondestructive Testing Handbook**, 1 ed., New York, Edited for the Society fo Nondestructive Testing, 1959.

MCCANN, D.M.; FORDE, M.C. **Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures.** NDT&E International 34 (2001) pp. 71-84.

NASCIMENTO, J.R. **Radiografia Digital Utilizando Alta Energia Para Inspeção de Material Fundido.** Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, 2016, 128p.

NAUS, D.J. **Inspection of nuclear power plant structures - overview of methods and related applications.** Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-2007/191, 2009.

NAUS, D.J.; GRAVES, H.L. **Detection of ageing of nuclear power plant structures.** Oak Ridge National Laboratory Report 106157, 1998.

NAUS, D.J. **Primer on durability of nuclear power plant reinforced concrete structures - A review of pertinent factors.** US Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-6927, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-2006/529, 2007.

Nature Publishing Group. Gamma-radiography. Vol. 151. April 10, 1943.

NORRIS, W.E.; NAUS, D.J.; GRAVES, H.L. **Inspection of nuclear power plant containment structures.** Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/CP-100051, 1997.

NUKAGA, J.A.; KITAZAWA, S.; HITACHI, H.K. **New scanning technique for X-ray computed tomography.** Power and Industrial Systems R&D Laboratory, Hitachi-shi, Elsevier Ltd, NDT&E International 2008.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Visto em: 13 de junho de 2019.

“Os primeiros aceleradores de partículas da USP”. **Universidade de São Paulo**. Disponível em: <<http://acervo.if.usp.br/maquinas1>>. Visto em: 20 de abril de 2019.

PAIVA, O.L.S.; SIMÕES, M.F. **Reviewing 10 years of operating experience with composite insulators at Chesf**. World Congress on Insulators, Arresters e Bushings 2009, Creta, Grécia, 2009.

PEDERSEN, T.K.; LARSEN, B.; JEPPESEN, L. **Experiences with a digital radiographic system and phosphor screens**. Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, Italy, 2000 October 15-21, (<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn751/idn751.htm>).

PEREIRA, R. Filmes e processamento radiográfico. 2006. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/docs/apostila-filme-e-processamento-radiografico/4741918/>>. Acesso em: 21 de outubro de 2025.

Portal Metálica. Torres de Transmissão de Energia. Disponível em: <<http://wwwo.metallica.com.br/torres-de-transmissao-de-energia>>. Acesso em: 13 de junho de 2019.

PUGLIESI, R.; ANDRADE, M.L.G. **Study of cracking in concrete by neutron radiography**. Appl. Radiat. Isot. Vol. 48, N. 3, pp. 339-344, Ed. Elsevier Science Ltd, 1997.

RAAD, J.A. **Radiografia Industrial - Técnica de formação de imagem**. General Electric Company-GE, Brasil, 2007.

REDMER, B.; WEISE, F. **Location of Reinforcement in Structures by Different Methods of Gamma-Radiography**. Likhatchev Institute of Theoretical and Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences (RUS), Disponível em <<http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v020/v020.htm>>. Acesso em: 23 fev. 2015.

REDMER, B.; WEISE, F.; EWERT, U.; LIKHATCHEV, A. **Location of reinforcement in structures by different methods of gamma-radiography.** International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin, Germany, 2003, September 16-19.

Report NEA/CSNI/R(98)6, *“Development priorities for non-destructive examination of concrete structures in nuclear plant”*.

Report NEA/CSNI/R(97)28. *“NEA workshop on development priorities for NDE of concrete structures in nuclear plants”*. Risley, United Kingdom, 1997 November 12.

RICHARDS, J.A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.** Springer-Verlag. Berlin, Germany, 1999, p. 240.

ROWLANDS, J.A. **The physics of computed radiography.** Phys. Med. Biol. 47, pp. R123-R166, 2002.

SAMEI, E.; SEIBERT, J.A.; ANDRIOLE, K.; BANDANO, A.; CRAWFORD, J.; REINER, B. et al. **AAPM/RSNA Tutorial on equipment selection: PACS equipment overview.** Radiography, v. 24, n. 3, p. 879-889, 2004.

SANTANA, V.J.F.; WAVRIK, J.F.A.G.; SILVA, S.S.M.; SHINOHARA, A.H.; XAVIER, G.J.V.; ALVES, K.G.B. **Study on Appearance of Ghost Radiographic Image in the Inspection by High Energy Computed Radiography.** In: *20th WCNDT – World Conference on Non-Destructive Testing*, Songdo Convensia, 27-31 May 2024, Incheon, Korea.

SATO, M. **Deployment of GPR system ALIS for humanitarian demining in Cambodia.** Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, Italy, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550135.

SATO, M. **Dual sensor ALIS for humanitarian demining and its evaluations test in mine Fields in Croatia.** IGARSS 2008-2008 IEEE International Geoscience and

Remote Sensing Symposium, Boston, MA, USA, 2008, pp. II-181-II-184, doi: 10.1109/IGARSS.2008.4778957.

SCHAETZING, R. **Computed radiography technology**. In: Advances in digital radiography: RSNA categorical course in diagnostic radiology physics. Chicago: RSNA, 2003.

SEMENSATO, L.F.G. **Inspeção em linhas de transmissão**. Revista: O setor elétrico. Publicado em 16 de setembro de 2024. Disponível em: < <https://www.osetoreletrico.com.br/inspecao-em-linhas-de-transmissao/>>. Visto em: 11 de dezembro de 2025.

SHAW, P. **Assessment of the deterioration of concrete in NPP - causes, effects and investigative methods**. NDT.net, Vol. 3, No. 2, 1998, (<http://www.ndt.net/article/0298/shaw/shaw.htm>).

SHAW, P.; PEDERSON, T.K.; SERLUPPENS, R. **High Energy Radiography Combined with Agfa Strukturix DPS- Imaging System and Comparison with other NDE Methods for inspection of thick reinforced concrete structures**. 2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. New Orleans, USA, May, 2000. (<http://www.ndt.net/article/v05n08/shaw/shaw.htm>).

SHAW, P.; RASMUSSEN, J.; PEDERSEN, T.K. **A practical guide to non-destructive examination of concrete**. Force Technology Report, 2004.

SHINOHARA, A.H.; ACIOLI, E.; KHOURY, H.J. **Avaliação da Técnica de Radiografia Digital em Gamagrafia**. In: 6 COTEQ - Congresso Nacional Sobre Tecnologia de Equipamentos, 2002, Salvador-BA. Anais do 6 COTEQ. São Paulo: ABENDE, 2002. v. 1. p. 1-11.

SHINOHARA, A.H.; AIHARA, S.; XAVIER, G.J.V.; ANTONINO, A.C.D.; PALHA, R.; FUJIWARA, H.; WAVRIK, J.F.A.G.; ALVES, K.G.B. **Inspection of Composite**

Insulators of 69 kV, 230 kV and 500 kV Aged in Outdoor Transmissions Powerlines by the Computed Radiography, Computed Microtomography and Charpy Impact Testing. *In: 20th WCNDT – World Conference on Non-Destructive Testing*, Songdo Convensia, 27-31 May 2024, Incheon, Korea.

SHINOHARA, A.H.; QUEIROGA, D.; WAVRIK, J.F.A.G.; SILVA JUNIOR, E.J.; FUJIWARA, H.; XAVIER, G.J.V.; LOTT NETO, H.B.D.T.; BRITTO, P.R.R.; FONTAN, M.A.B. **Exploration of High Sensitivity of the Computed Radiography for Insight Defects Inspection in Composite Insulators.** *In: 12th ECNDT – European Conference on Non-Destructive Testing*, June 11-15, 2018, Swedish Exhibition & Congress Center, Gothenburg, Sweden.

SHINOHARA, A.H.; WAVRIK, J.F.A.G.; FUJIWARA, H.F.; SA, P.I.; GARCEZ, E. **Evaluation of reinforced concrete of foundations and concrete towers of transmission lines 230 kV by high energy computed radiography system with betatron.** *In: WCCM 2017 – 1st World Congress on Condition Monitoring*, 13-16 June 2017, ILEC Conference Centre, London, United Kingdom (UK).

SHINOHARA, A.H.; WAVRIK, J.F.A.G.; FUJIWARA, H.; BARROS, V.S.M.; REGIS, P.A.; KOURY. **Evaluation of Reinforced Concrete of Foundations and Concrete Towers of Transmission Lines 230 kV by High Energy Computed Radiography System with Betatron.** *In: WCCM 2017 – 1st World Congress on Condition Monitoring*, 13-16 June 2017, ILEC Conference Centre, London, United Kingdom (UK). pp. 1225-1233, Volume 1 of 3, ISBN: 978-1-5108-4475-9.

SILVA, P.P.J.C.G.P.O. **Inspeção de degradação nos isoladores de compósito de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, 2009, 133p.

SPRAWLS, P. **Physical Principles of Medical Imaging.** Medical Physics Pub Corp., Second Edition, 656p., 1995. ISBN-13: 978-0944838549.

STOEV K. **High-Energy Digital Radiography of CANDU® Concrete Structures.** 10th International Conference on CANDU® Maintenance CW-20200-CONF-001 Toronto, Ontario, Canada, May 25-17, 2014.

TAGUCHI, S.K.C. **Obtenção de radiografia industrial digital de alta resolução utilizando radiação sincroton e imaging plate.** 2004. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

VAIDYA, P.R. **Flat panel detectors in industrial radiography.** Quality Control Section Quality Assurance Division Bhabha Atomic Reserach Centre Bombay – 400 085, India, 2007.

VARIAN Associates Inc. **Radiation Division - LINATRON 200/400/2000 Maintenaence Course**, Calif., USA, p 19-23, 1980.

VARIAN Radiation Divison. **High Energy X-Ray Application.** 2010.

VEITH, E.; BUCHERIE, C.; LECHIEN, J. L.; JARROUSSE, J.L.; RATTONI, B. **Inspection of Offshore Flexible Riser with Electromagnetic and Radiographic Techniques.** in Proc. of 15th WCNDT, Roma, pp. 1-9, 2000.

VILLAS, J.E.T. **Projeto Mecânico.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.uerjvillas.net.br/wp-content/uploads/2018/03/Livro-Trasmissao-II.pdf>>. Visto em: 30 de maio de 2019.

Wikipedia. **Townsend discharge.** Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Townsend_discharge>. Visto em: 14 jun 2025.

WAVRIK, J.F.A.G.; SHINOHARA, A.H.; FUJIWARA, H.; BARROS, V.S.M.; REGIS, P.A. **Inspection of Rebar Reinforced Concrete for Outdoor Transmission Lines by Digital Radiography Using High Energy X-Ray and High Sensitivity Imaging Plate Detectors.** IEEE ICSIPA, 2019.

WAVRIK, J.F.A.G.; SHINOHARA, A.H.; BARROS, V.S.M.; REGIS, P.A.; KOURY, H.J.; FUJIWARA, H. **Avaliação Laboratorial da Integridade Estrutural dos Tirantes em Torres de Concreto Armado de Linha de Transmissão com Radiografia Computadorizada de Alta Energia.** *In: CONAENDI 2020 – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção*, 9-11 Março 2021, Centro de Convenções Frei Caneca, São Paulo, Brasil.

WAVRIK, J.F.A.G.; SHINOHARA, A.H.; REGIS, P.A.; ALVES, K.G.B. **Efeito do filtro de cobre na inspeção de concreto armado de linhas de transmissão por radiografia computadorizada de alta energia – ensaio laboratorial.** *In: CONAENDI 2023 – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção*, 20-22 Setembro 2023, Centro de Convenções Frei Caneca, São Paulo, Brasil.

WAVRIK, J.F.A.G.; SHINOHARA, A.H.; XAVIER, G.J.V.; FUJIWARA, H.; REGIS, P.A.; TORIKAI, D.; ALVES, K.G.B. **Inspeção de Ferragens de Aço com Corrosão no Interior da Torre de Concreto Armado de Linha de Transmissão de 500 kV por Radiografia Computadorizada de Alta Energia: Avaliação Laboratorial.** *Revista Aracê - The Journal ARACÊ (ARE) ISSN: 2358-2472, A2 QUALIS CAPES 2017-2020. Volume 7, 5º edição. DOI: 10.56238/arev7n5-304.*

WAVRIK, J.F.A.G.; SHINOHARA, A.H.; XAVIER, G.J.V.; FUJIWARA, H.; ASSIS, T.M.O.; ALVES, K.G.B. **Inspection of Reinforced Concrete of Transmission Towers Powerline by High Energy Computed Radiography with Cooper and Lead Filters.** *In: 20th WCNDT – World Conference on Non-Destructive Testing*, Songdo Convencia, 27-31 May 2024, Incheon, Korea.

ZHANG, P.; WITTMANN, F.H.; ZHAO, T.; LEHMANN, E.H.; VONTOBEL, P. **Neutron radiography, a powerful method to determine time-dependent moisture distributions in concrete.** *Nuclear Engineering and Design* 241 (2011), pp. 4758-4766.