



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

WILLICLEYTON ANTONIO DE LIMA OLIVEIRA

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS
COMPUTADORIZADA DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 15 KV
OBTIDAS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Recife
2020

WILLICLEYTON ANTONIO DE LIMA OLIVEIRA

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS
COMPUTADORIZADA DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 15 KV
OBTIDAS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

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

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara.

Recife

2020

- O48v Oliveira, Willicleyton Antonio de Lima.
Validação experimental das imagens radiográficas
computadorizada dos isoladores poliméricos de 15 kV obtidas por
simulação numérica / Willicleyton Antonio de Lima Oliveira. - 2020.
92 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2020.
Inclui Referências.
1. Engenharia mecânica. 2. Isoladores poliméricos de 15 kV.
3. Falhas de fabricação dos isoladores. 4. Radiografia
computadorizada. 5. Simulação numérica de imagem
radiográfica. 6. Análise dimensional. I. Shinohara, Armando
Hideki (Orientador). II. Título.
- UFPE
- 621 CDD (22. ed.) BCTG/2021-104

WILLICLEYTON ANTONIO DE LIMA OLIVEIRA

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS
COMPUTADORIZADA DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 15 KV
OBTIDAS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Aprovada em: 29/10/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Cezar Henrique Gonzalez (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carlos Kenichi Suzuki (Examinador Externo)
Universidade Estadual de Campinas

Dedico inteiramente esse trabalho a Maria de Fátima Oliveira e ao Dr. Licínio Pereira por sempre estarem presentes e confiantes na conquista.

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial a minha mãe Maria de Fátima e ao Dr. Lício Pereira, por todo incentivo e encorajamento.

A todos os meus amigos do PPGEM-UFPE que me ajudou nessa jornada.

Ao meu orientador Prof. Armando Hideki Shinohara por toda paciência e dedicação de seu tempo para me ajudar a concluir a pesquisa.

Ao professor e grande amigo o Me. Robson Dias Ramalho por toda a ajuda e incentivos.

A CELPE pela doação dos isoladores poliméricos, e à STN pelo apoio financeiro para aquisição do escâner do sistema HD-CR 35 NDT do DEMEC/CTG/UFPE pelo projeto P&D.

Ao Daniel Queiroga pelo apoio na simulação numérica dos isoladores poliméricos.

Vem jogando tudo para fora,
A verdade apressa minha hora,
Vem revela a vida que é nova,
Abre os meus olhos agora.
(Marcos Almeida)

RESUMO

Os isoladores poliméricos de classe de 15 kV, tipo pino, fabricado de material polietileno de alta densidade (HDPE) estão substituindo rapidamente os isoladores tradicionais de vidro e porcelana das redes de distribuição elétrica de 13,8 kV no exterior e no País porque são manufaturados pelo processo bem estabelecido de injeção por ser um processo rápido, menor custo e redução de peso, produção em larga escala. Entretanto, sabe-se que o processo de injeção introduz defeitos ocultos do tipo vazios indesejados no interior dos isoladores poliméricos de 15 kV, que fragilizam as propriedades mecânicas e elétricas dos isoladores poliméricos, e não são detectados por inspeção visual após a sua fabricação porque são opacos e tem sido instalados em rede de distribuição elétrica. Isoladores poliméricos com falhas de fabricação podem causar desligamento permanente da rede de distribuição e restabelecendo somente após a sua substituição. Portanto, a inspeção e detecção de vazios no interior dos isoladores poliméricos e eliminá-los antes de serem instalados é de fundamental importância para as concessionárias elétricas. Dentre as técnicas de ensaios não destrutivos mais interessantes que possibilitariam inspecionar e detectar vazios no interior de isoladores poliméricos seria por imagem de radiografia. Em particular, o sistema de radiografia computadorizado (CR), que utiliza placas de imagem foto-estimulável (PSL-IP) flexível e de alta sensibilidade à radiação ionizante e possibilita resolução espacial de até 40 μm , é uma das interessantes. Em termos de sensibilidade do detetor PSL-IP é cerca de 100 a 1.000 vezes mais sensível em relação aos filmes tradicionais de raios-X desde as primeiras radiografias realizadas em 1896, tornando-o assim um sistema radiográfico bastante interessante também do ponto de vista de proteção radiológica. Para obter uma imagem radiográfica de alta qualidade e resolução espacial, há necessidade de controlar vários parâmetros radiográficos, em particular a penumbra geométrica (u_g). Um dos métodos de reduzir o efeito do u_g seria através do uso de uma fonte de radiação microfocal, mas além da potência (tensão e corrente elétrica aplicadas) ser limitada, é de elevado custo. Outro método seria de posicionar a fonte de radiação convencional o mais distante possível do objeto de interesse explorando a alta sensibilidade do detetor PSL-IP. No presente estudo, o método de distanciamento foi avaliado. Inicialmente, um software comercial dedicado para simulação numérica de imagem radiográfica industrial foi utilizado

para obter os parâmetros radiográficos variando a distância entre a fonte de raios-X e o isolador polimérico em até 10 m. E para validar os parâmetros radiográficos obtidos na simulação numérica, ensaios laboratoriais foram realizados, mas limitando-se a distância máxima de 1 m entre uma fonte de raios-X e o objeto de estudo. Como resultado, imagens radiográficas de alta resolução espacial foram obtidas num tempo de exposição menor de 60 segundos, e detalhes da região de interesse foram realçados através de processamento de imagem digital com software dedicado para radiografia industrial. Ademais, realizando a calibração do tamanho do pixel da imagem radiográfica digital, a análise dimensional das partes interna e externa foi realizada com sucesso.

Palavras-chave: engenharia mecânica; isoladores poliméricos de 15 kV; falhas de fabricação dos isoladores; radiografia computadorizada; simulação numérica de imagem radiográfica; análise dimensional.

ABSTRACT

Polymeric insulators of 15 kV class, pin type, made of high density polyethylene (HDPE) material are rapidly replacing the traditional insulators of glass and porcelain of the 13.8 kV electrical distribution networks in abroad and in the country, because they are manufactured by the well established injection process for being a fast process, lower cost and weight reduction, large scale production. However, it is well known that the injection process can generate unwanted defects such as void inside of the 15 kV polymeric insulators, which affect the mechanical and electrical properties of the polymeric insulators. Polymeric insulators of 15 kV with manufacturing failures containing voids can cause permanent shutdown of electrical distribution and only recovered after the replacement of failed polymeric insulators. Therefore, the advanced inspection and detection of voids inside the polymeric insulators and eliminating them before they are installed is of fundamental importance for electrical utilities. Voids inside can not be detected by visual inspection because the polymeric insulators of 15 kV are gray color and opaque. Aiming to detect such voids in polymeric insulator before installation at the electric distribution, radiography is interesting among the nondestructive testings. In particular, the computerized radiography (CR) system is desirable because high sensitive photo-stimulable image plates (PSL-IP) flexible and of ionizing radiation detector and spatial resolution of up to 40 μm is already available. In terms of sensitivity of PSL-IP detector, it is 100 to 1,000 times more sensitive than the traditional X-ray films since the first radiographic image was taken in 1896. Furthermore, that high sensitive of the detector it is also interesting from radiological protection point of view. In order to obtain a high quality radiographic image and spatial resolution, it is necessary to control several radiographic parameters, in particular the geometric unsharpness (u_g). One of the methods to reduce the effect of the u_g is the use of a microfocal radiation source, but the power (voltage $\times$ electric current) is limited and very expensive. Another method keep the position the conventional radiation source as far as possible from the object of interest exploring the high sensitivity of the PSL-IP detector. In the present study, the distance method was evaluated the polymeric insulator. So, initially, a commercial numerical simulation software of radiographic image for industrial radiography was used to simulate radiographic images of the 15 kV polymeric insulators varying the distance between the X-ray source and the

polymeric insulator up to 10 m. In order to validate the radiographic parameters obtained in the numerical simulation, laboratory testing were carried out, however, the maximum distance between X-ray source and polymeric insulators up to 1 m. As a result, high spatial resolution radiographic images were obtained of polymeric insulator of 15 kV in an exposure time less than 60 seconds. Furthermore, details of region of interest were enhanced through digital image processing. In addition, by performing the pixel size calibration of the digital radiographic image, the dimensional analysis of the internal and external parts of the 15 kV polymeric insulator was performed.

Keywords: mechanical engineering; polymeric insulators of 15 kV; manufacturing failures in polymeric insulators; computed radiography; numerical simulation of radiographic image; dimensional analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da sensibilidade dos detectores de imagens radiográficas desde a primeira imagem em 1896 pelo Rontgen.	21
Figura 2 - Esquema mostrando geração, transmissão e distribuição (demarcada em linha tracejada em vermelho).	23
Figura 3 - Isoladores utilizados em redes de distribuição de 13,8 kV: poliméricos, isoladores de porcelana e isoladores de vidro de classe 15 kV.	24
Figura 4 - Linha de distribuição de 13,8 kV no Campus da UFPE de Recife-PE.	25
Figura 5 - Isolador polimérico tipo pino de classe 15 kV em estrutura de concreto armado na rede distribuição com cabo nu no Campus da UFPE de Recife.	25
Figura 6 - Modos de fixação de cabo condutor encapado e nu no isolador polimérico tipo pino de 15 kV.	26
Figura 7 - Fotos de isoladores poliméricos de 15 kV após a ocorrência de com interrupção elétrica.	26
Figura 8 - Isolador polimérico tipo pino de classe 15 kV e esquema de um isolador polimérico de 15 kV mostrando o interior contendo a rosca e a massa para evitar formação de vazios.	27
Figura 9 - Fatores que degradam as propriedades mecânicas e elétricas dos isoladores poliméricos.	29
Figura 10 - Defeito de fabricação em isoladores poliméricos tipo pino.	30
Figura 11 - Distribuição de campo elétrico entre o cabo condutor e o pino aterrado.	31
Figura 12 - Ocorrência de flashunder entre o cabo condutor e o pino.	31
Figura 13 - Imagem radiográfica de um isolador polimérico de classe 15 kV mostrando a presença de um vazio na parte central entre o cabo condutor e pino aterrado. Do lado direito, mostra um esquema da ocorrência de descarga parcial no vazio em material isolante em função da presença de campo elétrico de alta tensão.	32
Figura 14 - Radiografia mostrando vazios na região crítica entre cabo condutor e ferragem de fixação.	34
Figura 15 - Vazio detectado no isolador polimérico de classe 15 kV por radiografia digital.	34
Figura 16 - Radiografia computadorizada de isolador polimérico de classe 15 kV.	35

Figura 17 - Esquema típico de radiografia pelo método de absorção.	35
Figura 18 - Esquema sobre intensidade de radiação incidente e transmitida.	37
Figura 19 - Lei de Newton sobre diminuição da intensidade da radiação com o quadrado da distância. “S” é a intensidade de radiação na origem da fonte.....	38
Figura 20 - Esquema de penumbra gerada de pelo tamanho focal na origem da fonte de radiação quando a dimensão é finita. Portanto, para aumentar a capacidade de resolução em termos de contraste do sistema radiográfico, afastar a fonte de radiação do objeto de interesse é estratégico.	39
Figura 21 - Esquema para calcular a dimensão da penumbra geométrica (U_g).	40
Figura 22 - Efeito da distância entre a fonte de radiação e o filme de raios-X no discernimento da trinca. Quanto maior a distância da fonte de radiação, maior o discernimento. Esquema (a) refere-se uma amostra de aço de 25 mm de espessura, uso de raios-X e filme tipo MX da Kodak. O esquema (b) refere-se uma amostra de aço de 75 mm de espessura, fonte de radiação de ^{60}Co e filme Agfa D-7. Curvas A e B são para trincas e Ce D para fios.....	40
Figura 23 - Mecanismo de funcionamento do IP. Luminescência foto-estimulada (PSL). Mecanismo de - BaFBr: Eu ²⁺ . É o mesmo mecanismo para BaFCl: Eu ²⁺ e para BaFI: Eu ²⁺	41
Figura 24 - Explicação didática sobre o funcionamento do IP fazendo analogia com uma bomba hidráulica e tanque de água. Mecanismo de luminescência foto- estimulada.	42
Figura 25 - Detective Quantun Efficiency da placa de imagem PSL-IP.....	42
Figura 26 - Mostra a excepcional sensibilidade do Imaging Plate (IP), com duas a três ordens superiores em relação ao filme de raios-X, além da linearidade (faixa dinâmica).....	43
Figura 27 - Procedimento simplificado de processamento do uso e reuso do Imaging Plate (IP): exposição, leitura, apagamento e reuso.....	45
Figura 28 - Resolução do IP em função do tipo de IP e escâner a laser utilizado para leitura.	46
Figura 29 - Três componentes principais na modelagem computacional para obter imagens radiográficas virtualmente.	47
Figura 30 - Algoritmo para obtenção de imagem radiográfica virtual.	49
Figura 31 - Efeito da radiação espalhada pela matéria na redução do contraste.	49

Figura 32 - Função quase linear entre a dose e tom de cinza para Ir-192.	51
Figura 33 - Configuração de validação com cunha de degraus de aço ferrítico.	52
Figura 34 - Perfis de valor de cinza obtidos ao longo do passo cunha com CIVA e experimentalmente.	53
Figura 35 - Curvas de distribuição de energia-intensidade experimentais suavizadas para raios X de 100, 200, 300 e 400 kV, obtidas com espectrômetro de cintilação. .	54
Figura 36 - Relação energia em função do coeficiente de atenuação linear para material ferro.	56
Figura 37 - Fluxograma de processamento de imagem digital de imagem radiográfica em dois estágios: Aquisição de imagens digital e processamento de imagem digital.	57
Figura 38 - Fotos do isolador polimérico tipo pino classe 15 kV utilizado para o estudo na presente dissertação.	61
Figura 39 - Esquemas de um isolador polimérico classe 15 kV tipo pino utilizado no presente estudo.	62
Figura 40 - Indicação do local em que foi realizado um furo passante com broca de 4 mm no Isolador polimérico de 15 kV simulando um defeito de fabricação de vazio milimétrica.	62
Figura 41 - Esquema de método de absorção adotado para ensaios de simulação numérica de imagem radiográfica e ensaio experimental.	64
Figura 42 - Página para inserir Simulação numérica.	64
Figura 43 - Sistema de radiografia computadorizada empregado na validação do parâmetro radiográfico.	65
Figura 44 - Processo básico da radiografia computadorizada.	66
Figura 45 - Foto de isoladores poliméricos tipo pino de classe 15 kV instalados e em operação numa estrutura de concreto armado de uma rede de distribuição de 13,8 kV com cabo nus.	68
Figura 46 - Foto em detalhe mostrando um isolador polimérico de pino de classe 15 kV na estrutura de concreto armado fixado no pino metálico de uma rede de distribuição de 13,8 kV com cabo condutor nú e com um grau de degradação.	68
Figura 47 - Esquema de um isolador polimérico pino de classe 15 kV na estrutura de concreto armado de uma rede de distribuição de 13,8 kV com cabo condutor nú fixado num pino metálico.	69

Figura 48 - Simulação numérica com distância entre a fonte de raios-X e IP de 0,60 m.	71
Figura 49 - Isolador polimérico de com a distância de 0,60 m.	71
Figura 50 - Simulação numérica com distância entre a fonte de raios-X e IP de 5,0 m.	72
Figura 51 - Isolador polimérico de pino posicionado à 5,0 m da fonte de raios-X.	72
Figura 52 - Simulação numérica com distância entre a fonte de raios-X e IP de 10,0 m.	73
Figura 53 - Isolador de pino SFD 10,0 m.	73
Figura 54 - Simulação numérica da imagem radiográfica como obtidas posicionando	74
Figura 55 - Simulação numérica das imagens radiográficas como obtidas posicionando o isolador polimérico a 5 m entre a fonte de radiação e o isolador polimérico.	75
Figura 56 - Simulação numérica das imagens radiográficas como obtidas posicionando o isolador polimérico a 10 m entre a fonte de radiação e o isolador polimérico.	75
Figura 57 - Simulação numérica das imagens radiográficas como obtidas posicionando o isolador polimérico à 0,6 m, 5 m e 10 m entre a fonte de radiação e o isolador polimérico.	77
Figura 58 - Imagem radiográfica como obtida (acima) e processada com filtro “Pseudo Plast” (abaixo) mostrando vazios simulados.	78
Figura 59 - Imagem radiográfica simulada do isolador de pino de 15 kV com furo de 4 mm posicionado à 0,6 m como obtida e com processamento de imagem digital com o filtro Pseudo-Plast.	79
Figura 60 - Imagem radiográfica simulada do isolador de pino de 15 kV com furo de 4 mm posicionado à 0,6 m como obtida e com processamento de imagem digital com o filtro Pseudo-Plast.	80
Figura 61 - Imagem radiográfica simulada positiva e negativa do isolador polimérico de pino de 15 kV com furo de 4 mm posicionado à 0,6 m como obtida e com processamento de imagem digital com o filtro Pseudo-Plast.	81
Figura 62 - Imagem radiográfica experimentalmente como obtida posicionando à 1,0 m.	82

Figura 63 - Imagem radiográfica experimentalmente como obtida posicionando à 1,0 m.	82
Figura 64 - Imagem processada com filtro “enhance detail” do software ISee!.....	83
Figura 65 - Imagem processada com filtro “Pseudo Plast”.....	83
Figura 66 - Análise dimensional do isolador polimérico de 15 kV estudo no presente estudo.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACSR	Aluminum Cable Steel Reinforced
ASTM	American Society of Testing Materials
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (Instituto Federal de Pesquisa e Teste de Materiais)
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
CR	Computed Radiography
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor
EM	European Norm (Norma Européia)
END	Ensaio Não-Destrutivo
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor
IP	Imaging Plate (Placa de Imagem)
IQI	Indicador de Qualidade em Imagem
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MTF	Modulation Transfer Functions
NR-10	Norma Regulamentadora No.10
OSL	Luminescência Opticamente Estimulada
POD	Probability of detection (Probabilidade de Detecção)
ROI	Region of interest (Região de Interesse)
SCC	Stress Corrosion Cracking

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE 15 KV USADOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE 13,8 KV.....	27
2.2	SISTEMA DE RADIOGRAFIA DIGITAL COM DETETOR IMAGING PLATE	35
2.2.1	Princípio de radiografia por Absorção.....	35
2.3	TEORIA BÁSICA DE FORMAÇÃO DA IMAGEM RADIOGRÁFICA E MODELAGENS ADOTADAS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA ATRAVÉS DE SOFTWARE CIVA-RT.....	46
2.3.1	Modelagem do Detector de Imagem Plate (PSL-IP)	49
2.3.2	Modelagem da fonte de raios-X.....	53
2.3.3	Solução de beer – lambert para radiação direta	54
2.3.4	Determinação da radiação espalhada por Monte Carlo	55
2.4	PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAL.....	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	61
3.1	ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 15 KV TIPO PINO	61
3.2	SIMULADOR DEDICADO PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE IMAGEM RADIOGRÁFICA VIRTUAL DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 15 KV	63
3.3	SISTEMA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADO PARA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS RADIOGRÁFICOS	65
3.3.1	Processamento de Imagem Digital	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	DANOS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE DE 15 KV NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO TIPO PINO INSTALADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM PERNAMBUCO	67
4.2	IMAGENS RADIOGRÁFICAS OBTIDAS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE DE 15 KV	70

4.3	IMAGENS RADIOGRÁFICAS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE DE 15 KV OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADO	81
5	CONCLUSÕES	85
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, as linhas de distribuição de energia elétrica empregam isoladores de vidro e porcelana. Entretanto, visando reduzir o custo sem comprometer a confiabilidade operacional do sistema elétrico, as concessionárias começaram utilizar isoladores poliméricos (PAPAILIOU e SCHMUCK, 2013), os quais são fabricados pelo processo de injeção (por exemplo, FARIA et al., 2021). Por outro lado, devido às falhas de fabricação, degradação por intemperismo dos isoladores poliméricos, há ocorrências de falhas dos isoladores e consequentemente interrupções de fornecimento de energia elétrica em definitivo. Os isoladores poliméricos são equipamentos empregados em todos os ramos do sistema elétrico de potência.

Especificamente, após a instalação na estrutura de linhas de distribuição de energia elétrica, a inspeção e monitoramento da integridade estrutural dos isoladores poliméricos de 15 kV tipo pino em condições energizadas é de maior interesse para a manutenção da confiabilidade do sistema elétrico. Usualmente, a inspeção visual é empregada utilizando binóculos potentes, câmeras de alta resolução acopladas ou não aos drones, imagens de termografia por infravermelho para detectar pontos, ultrassom (MENDONÇA, 2013). Entretanto, estas técnicas de inspeção e monitoramento ficam limitadas à inspeção de falhas relacionadas essencialmente às partes externas dos isoladores poliméricos. Por outro lado, a técnica de inspeção por imagem radiográfica é uma técnica tradicional empregada nas indústrias, que permite avaliar o interior. Estudos pioneiros de aplicação de radiografia no setor elétrico têm sido realizados no Brasil com apoio do Programa P&D da ANEEL (ANEEL), em que os resultados mostraram promissores para a inspeção e monitoramento dos isoladores poliméricos em linhas de transmissão de até 500 kV para avaliar a integridade estrutural (FUJIWARA, et al., 2017; SHINOHARA et al., 2017a; SHINOHARA et al., 2017b; SHINOHARA et al., 2017c; LOTT NETO, et al. 2017; SHINOHARA et al., 2018). Os isoladores elétricos de vidro, poliméricos de 69 kV, 138 kV, 230 kV tem sido inspecionados com uso de radiografia computadorizado usando o imaging plate e tem se mostrado uma técnica interessante, porque permite inspecionar defeitos ocultos no interior de isoladores elétricos em tempo bastante curto quando comparado com filme de raios-X (SHINOHARA, ACIOLI E KHOURY, 2002; SHINOHARA et al., 2007; SILVA, 2009;

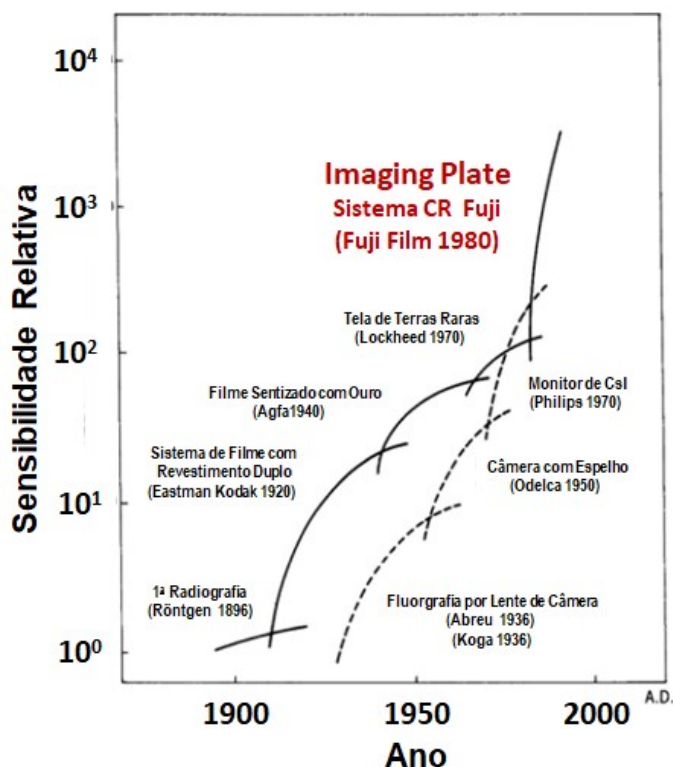
SILVA et al., 2012; MENDONÇA, 2013). Embora o potencial aplicativo é grande, entretanto, a técnica inspeção por radiografia ainda não é utilizada rotineiramente no monitoramento de isoladores poliméricos em linhas de transmissão por questão técnica, tempo relativamente longo. Com respeito à inspeção de isoladores poliméricos em redes de distribuição a dificuldade é maior devido o sistema ser compacto, por questões técnica, elevado custo, necessidade de planos de proteção radiológica. Por outro lado, o CIGRÉ-Brasil, sociedade internacional mais importante do setor elétrico com a sede principal em Paris, França, baseados nos resultados de pesquisa no Brasil por grupo de pesquisa essencialmente da UFPE recomenda a utilização da técnica de radiografia para inspeção de isoladores poliméricos de 15 kV após a fabricação visando eliminar os que apresentarem defeitos internos e pela sua capacidade adicional de inspeção dos isoladores e em relação às técnicas atualmente em uso (CIGRÉ-BRASIL, 2008).

A inspeção radiográfica por método de absorção para avaliar o interior de corpos opacos à luz na faixa visível tem uma tradição de mais de 125 anos, desde a descoberta de raios-X em 1895 e a realização e divulgação da primeira imagem radiográfica em 1896 por Wilhem Röntghen, na Alemanha. Desde então, vários tipos de filmes de raios-X de alta resolução espacial, alta sensibilidade têm sido desenvolvidos ao longo deste período, que podem ser expostos à radiação ionizante de raios-X por um tempo relativamente longo até atingir a densidade óptica 4, bem como detectar falhas internas com dimensões inferiores a 12 μm (EWERT, ZSCHERPEL and BAVENDIEK, 2007). Com o desenvolvimento e avanço da tecnologia da microeletrônica a aplicação de efeitos de luminescência em cristais, detectores de radiação ionizantes inovativos e de alta sensibilidade tais como *Imaging Plate* (IP) foram desenvolvidos (TATENO, IINUMA e TAKANO, 1987), aliado ao advento de computadores cada vez mais velozes e baratos, desenvolvimento de softwares que estão substituindo o sistema de radiografia industrial convencional devido a uma série de vantagens técnicas tais como:

- Alta sensibilidade à radiação ionizante;
- Não requer uso de produtos químicos para obter a imagem radiográfica e nem câmara escura;
- Possibilita processamento da imagem digital para realçar detalhes de interesse;
- Armazenar e transmitir via internet.

Ademais, em função da alta sensibilidade dos sistemas digitais de detecção de radiação ionizante e de imagens quando emprega o Imaging Plate, são também bastante interessantes do ponto de vista também de proteção radiológica por reduzir o tempo de exposição (FUJIFILM). A placa bidimensional de imagem radiográfica que armazena a imagem radiográfica de forma latente, a qual é constituída de cristais de fósforo foto-estimulável dopada com Eu^{+2} depositados sobre placa de poliéster flexível, denominado de Imaging Plate (PSL-IP), foi desenvolvido na década de 80 e pode ser reutilizada de 1.000 a 10.000 vezes, além da alta sensibilidade de 100 a 1.000 vezes em relação aos primeiros filmes em 1896 (TATENO, IINUMA e TAKANO, 1987), como mostra a figura 1.

Figura 1 - Evolução da sensibilidade dos detectores de imagens radiográficas desde a primeira imagem em 1896 pelo Röntgen



Fonte: Takano, 1987.

Na presente dissertação, o objetivo geral foi de avaliar a potencialidade aplicativa da alta sensibilidade do detector de radiação ionizante Imaging Plate não somente para inspecionar a integridade estrutural dos isoladores poliméricos de 15 kV após a manufatura pelo processo de injeção, mas também em operação na rede distribuição por radiografia digital. Como objetivo específico, validar

experimentalmente em laboratório os parâmetros radiográficos obtidos por simulação numérica através de software comercial CIVA-RT, versão 11.

Em termos de estruturação da presente dissertação, o capítulo 2 traz a revisão bibliográfica sobre isoladores poliméricos utilizados em linhas de distribuição de 13,8 kV. Fundamentos da radiografia computadorizada pelo método de absorção e a análise sobre a potencialidade aplicativa da tecnologia de placa de imagem como detector de radiação ionizante de alta sensibilidade denominado de Imaging Plate utilizando simulador numérico de radiografia computadorizado. É realizada também uma breve descrição da base teórica e as modelagens computacionais empregadas no software comercial CIVA-RT de simulação numérica de um sistema de radiografia computadorizado.

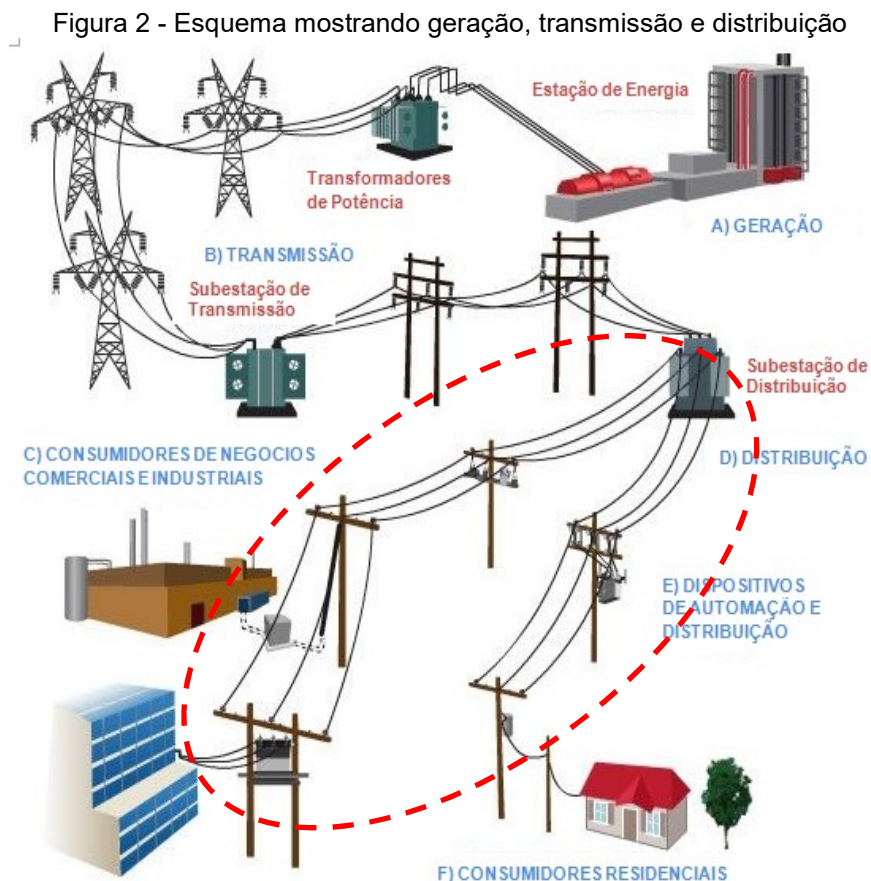
No capítulo 3 é descrito os isoladores poliméricos de 15 kV empregados na presente dissertação, sobre o procedimento do uso do software comercial para simulação numérica de imagem radiográfica CIVA-RT Versão 11 utilizado para simular um sistema de radiografia computadorizado e o workstation empregado para estudo de simulação numérica, o qual é um computador de alta performance com processadores de vários núcleos visando realizar a simulação numérica de forma relativamente rápida. Sobre o sistema de radiografia computadorizado para realização experimental para validação dos parâmetros radiográficos obtidos através de simulações numéricas em laboratório. Software ISee! foi utilizado para o processamento de imagem e análise dimensional.

No capítulo 4 são apresentadas as discussões dos resultados de imagens radiográficas dos isoladores poliméricos de 15 kV obtidos por simulação numérica e experimental. A simulação numérica de imagem radiográfica foi realizada variando a distância da fonte de raios-X ao isolador polimérico entre 0,30 m até 10 m. Com respeito à validação experimental em laboratório dos parâmetros radiográficos, a distância entre a fonte de radiação e o isolador polimérico. Para ilustrar isoladores poliméricos de 15 kV foram fotografados em rede de distribuição são também apresentadas.

No capítulo 5 são apresentadas, de forma enumerada, as conclusões obtidas no presente estudo sobre a interpretação das imagens radiográficas obtidas de simulação numérica e validação experimental em laboratório. São apresentadas também sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para levar a energia elétrica gerada num determinado local até ao consumidor final passa por três etapas: (i) a geração, que utiliza a conversão de uma energia primária advinda de fontes hidráulica, eólica, solar ou térmica, nuclear em energia elétrica. Após a geração a tensão é elevada para alta e extra-alta tensão através de transformador de potência; (ii) a transmissão, que é responsável pelo transporte de energia do local em que é gerada até as proximidades dos centros consumidores, mais exatamente até subestações. Transportada até as subestações e a tensão é baixada para serem transportadas pela linha de distribuição; e (iii) a rede de distribuição é responsável pela entrega dessa energia aos consumidores finais. A figura 2 ilustra esquematicamente as três partes básicas de um sistema elétrico desde a geração até a distribuição de energia elétrica nas indústrias e residências.



Fonte: PINTEREST, 2020.

*(demarcada em linha tracejada em vermelho).

Especificamente, na construção de uma linha de transmissão e de distribuição, os custos de isoladores elétricos giram em torno de 5% a 8% do custo

total de uma nova linha, mas quando as linhas entram em operação, em torno de 70% dos custos de manutenção é devido aos problemas nos isoladores elétricos e isto tem chamado atenção dos fabricantes dos isoladores, engenheiros de manutenção e de pesquisadores para compreender as causas que levam à interrupção de fornecimento de energia elétrica devido a falha nos isoladores elétricos (GORUR, SHAFFNER e CLARK, 1995; DOKIC et al., 2016).

Em termos de materiais de fabricação dos isoladores para uso em linhas de distribuição, por muitas décadas, são utilizados isoladores fabricados de materiais vítreos, porcelana, porém com a evolução da engenharia de materiais, com o advento de materiais poliméricos, isoladores poliméricos passaram a serem utilizados em linhas de transmissão e redes de distribuição (PAPAILIOU AND SCHMUCK, 2013).

Figura 3 - Isoladores utilizados em redes de distribuição de 13,8 kV: poliméricos, isoladores de porcelana e isoladores de vidro de classe 15 kV



Isoladores de Vidro

Isolador de Porcelana

Isolador Polimérico

Fonte: O Autor, 2020.

A figura 4 mostra uma foto estruturas de concreto armado de uma rede de distribuição de 13,8 kV utilizando isoladores poliméricos em substituição dos isoladores de porcelana e vidro. A figura 5 mostra em mais detalhe os isoladores poliméricos instalados com cabos condutores nus. Na figura 6 são mostradas como os cabos condutores devem ser fixados no isolador polimérico de 15 kV tipo pino. Especificamente, com respeito ao cabo condutor nu, o cabo deve possuir um material polimérico para não danificar o isolador polimérico em função das durezas serem diferentes e evitar o desgaste, causando erosão.

Figura 4 - Linha de distribuição de 13,8 kV no Campus da UFPE de Recife-PE



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 5 - Isolador polimérico tipo pino de classe 15 kV em estrutura de concreto armado na rede distribuição com cabo nu no Campus da UFPE de Recife



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 6 - Modos de fixação de cabo condutor encapado e nu no isolador polimérico tipo pino de 15 kV



Fonte: PLP - Preformed Line Products, 2021.

A figura 7 mostra os resultados de danos nos isoladores poliméricos de 15 kV causado por disrupção elétrica (BARBOSA E MACEDO, 2004; MENDONÇA E SHINOHARA, 2010). A ocorrência de tais disrupções elétricas causaram derretimento, perfurações nos isoladores poliméricos, e conseqüentemente, desligamento definitivo da rede de distribuição e a religação somente com a sua substituição. Pode-se atribuir que tais tipos de danos ocorreram devido ao uso de cabo condutor nu e a presença de vazios presentes no interior do isolador polimérico na região entre o cabo condutor e o pino de fixação, vazios resultado de falha de fabricação e não detectados na fase de avaliação de conformidade por parte das concessionárias.

Figura 7 - Fotos de isoladores poliméricos de 15 kV após a ocorrência de com disrupção elétrica

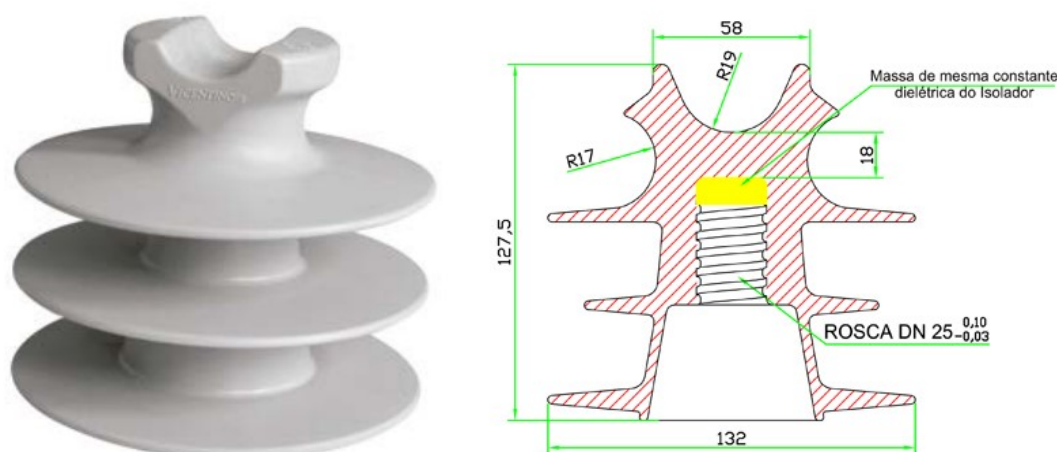


Fonte: BARBOSA E MACEDO, 2004; MENDONÇA E SHINOHARA, 2010.

2.1 ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE 15 KV USADOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE 13,8 KV

Os isoladores poliméricos de classe 15 kV tipo pino não possuem núcleo de compósito GFPR – fibras de vidro reforçado com plástico, como possuem isoladores de 69 kV e superiores, porque são utilizados em suspensão mecânica para suportar o peso do cabo condutor em linha de transmissão, possuindo assim o tamanho e formato conforme as figuras a seguir na figura 8. Na figura 8 observa-se também um detalhadamente do isolador polimérico de 15 kV mostrando as morfologias externa através de um esquema de fabricação do isolador polimérico típico de tipo pino de classe 15 kV.

Figura 8 - Isolador polimérico tipo pino de classe 15 kV e esquema de um isolador polimérico de 15 kV mostrando o interior contendo a rosca e a massa para evitar formação de vazios



Fonte: Vicentinos, 2020; Ancora Industrial, 2020

Como mostrado na figura 6, o isolador polimérico de pino é usado da mesma forma que os isoladores tradicionais de vidro e porcelana para isolar um cabo condutor, que pode estar nu ou encapado com plástico, o qual é fixado num pino.

Na tabela 1 estão listadas as propriedades elétricas, físicas e mecânicas dos isoladores de pino de classe 15 kV. FV60D: Tensão disruptiva em frequência industrial a seco, 60 Hz e FV60W: Tensão disruptiva em frequência industrial sob névoa, 60 Hz (ALUMA-FORM; HENDRIX MOLDED PRODUCTS; ROYAL INSULATORS & POWER PRODUCTS; PINGXIANG HUACI INSULATOR GROUP CO.; SENDUO; ORIENT POWER); IFP: Tensão disruptiva de impulso e de manobra

positivo (ALUMA-FORM; HENDRIX MOLDED PRODUCTS; HIVOLT; PEAK DEMOND UTILITY PRODUCTS; ROYAL INSULATORS&POWER); IFN: Tensão disruptiva de impulso de manobra negativo (ALUMA-FORM; PEAK DEMOND UTILITY PRODUCTS; ROYAL INSULATORS&POWER); LFP: Tensão de perfuração do isolador à baixa frequência (ALUMA-FORM; PINGXIANG HUACI INSULATOR GROUP; ROYAL INSULATORS&POWER PRODUCTS; ORIENT POWER); LD: Distância de escoamento (PEAK DEMOND UTILITY PRODUCTS; ROYAL INSULATORS&POWER); NW: Peso aproximado (ROYAL INSULATORS&POWER); CS: Carga máxima lateral (ALUMA-FORM; HENDRIX MOLDED PRODUCTS; PEAK DEMOND UTILITY PRODUCTS; ROYAL INSULATORS&POWER).

Tabela 1 - Propriedades elétricas, físicas e mecânicas dos isoladores de pino classe 15 kV em comparação com isolador de porcelana de mesma classe

Tipo de Isolador [kV]	Propriedades						
	Elétrica					Física	Mecânica
	FV60D [kV]	IFP [kV]	IFN [kV]	LFP [kV]	LD [mm]	NW [kg]	CS [N]
	FV60W [kV]						
Polimérico de HDPE	70-75	90-130	130-140	90-160	228	0,60	11.121
	30						
Porcelana	65	105	130	95-115	299	1,67	13.347
	35						

Fonte: O Autor, 2020.

Os isoladores elétricos possuem importante função de manter a confiabilidade do sistema elétrico e continuidade do fornecimento de energia nas linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, e as suas vantagens em relação aos isoladores tradicionais de vidro ou cerâmicas, como por exemplo: baixo peso, baixo custo, possui boa resistência mecânica, melhor resistência às condições de poluição em ambientes úmidos, em especial a hidrofobicidade, e boa performance elétrica. Os isoladores poliméricos tipo de pino de classe 15 kV são fabricados de materiais poliméricos polietileno de alta densidade – HDPE pelo processo de injeção e possui geometria necessária para suportar elevados níveis de tensão e campo elétrico, mas para isso devem estar em perfeitas condições (SILVA et al., 2012; BONOMO, 2003; GODOI e SWINKA-FILHO, 2005). O isolador de HDPE tem as seguintes vantagens:

1. Excelente resistência à faixa; 2. Alta resistência química; 3. Inquebrável e leve; 4. Manuseio e transporte mais fáceis; 5. Baixo custo inicial; 6. Longa vida útil; 7. Botões de metal duráveis; 8. Superfície repelente à água; 9. Alta resistência à tração, flexão e impacto; 10. Pode ser fixado por anel elastomérico ou laço plástico pré-moldado.

Uma das desvantagens dos isoladores poliméricos em relação aos isoladores de vidro e de porcelana, por ser um produto novo, é a dificuldade de obter índice de degradação ao longo da sua vida útil, sendo mais facilmente encontrados quando o isolador já está na iminência de apresentar falha, dificultando, portanto, a detecção e planejamento da substituição do mesmo (GODOI e SWINKA-FILHO, 2005). A figura 9 mostra os fatores que degradam o isolador polimérico.

Figura 9 - Fatores que degradam as propriedades mecânicas e elétricas dos isoladores poliméricos

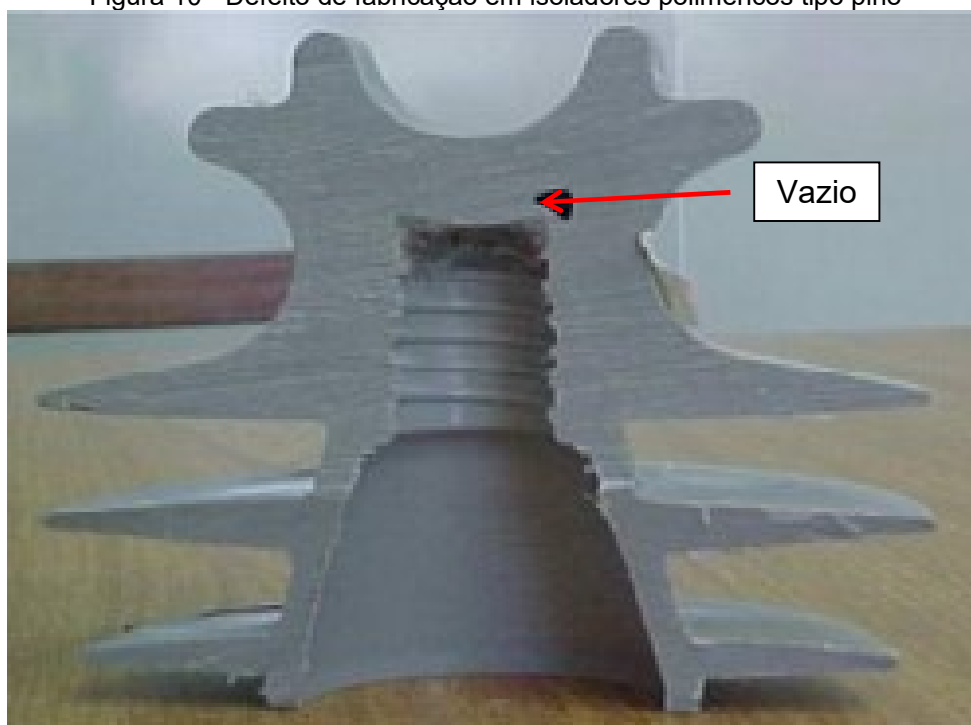


Fonte: O Autor, 2020.

O isolador danificado causa o desligamento da linha, gerando custos de manutenção com a reposição desses componentes e o aumento do tempo de interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores (MENDONÇA, 2013; SHINOHARA et al., 2017). Com isso, formas de se obter índice de degradação de que tais isoladores estão se deteriorando, com detecção do fenômeno em um tempo hábil para a substituição do isolador, são extremamente importantes, visto que os isoladores são equipamentos essenciais para o sistema elétrico e que os tipos poliméricos estão sendo amplamente utilizados, em substituição àqueles de vidro ou porcelana (GODOI e SWINKA-FILHO, 2005).

Assim pode-se citar como uma das principais desvantagens a existência de defeitos no seu interior: falhas na fabricação ou algum estresse mecânico podem gerar vazios ou fissuras que podem modificar o comportamento desses isoladores, quando submetidos a estresses elétricos. Os vazios tendem a aparecer em superfícies mais espessas da peça e podem ocorrer quando a camada externa do isolador esfria, solidificando mais rapidamente do que a interna, causando por sua vez o “vazio” (GODOI e SWINKA-FILHO, 2005; SILVA, 2013). Com exceção das correntes por trilhamento, que ocorrem na superfície, falhas e defeitos que geram calor no isolador polimérico tipo pino ocorre normalmente na região situada entre as partes que possuem a maior diferença de potencial conforme a figura 10, ou seja, entre o condutor e o pino (MARTINS, 2015; GODOI e SWINKA-FILHO, 2005).

Figura 10 - Defeito de fabricação em isoladores poliméricos tipo pino



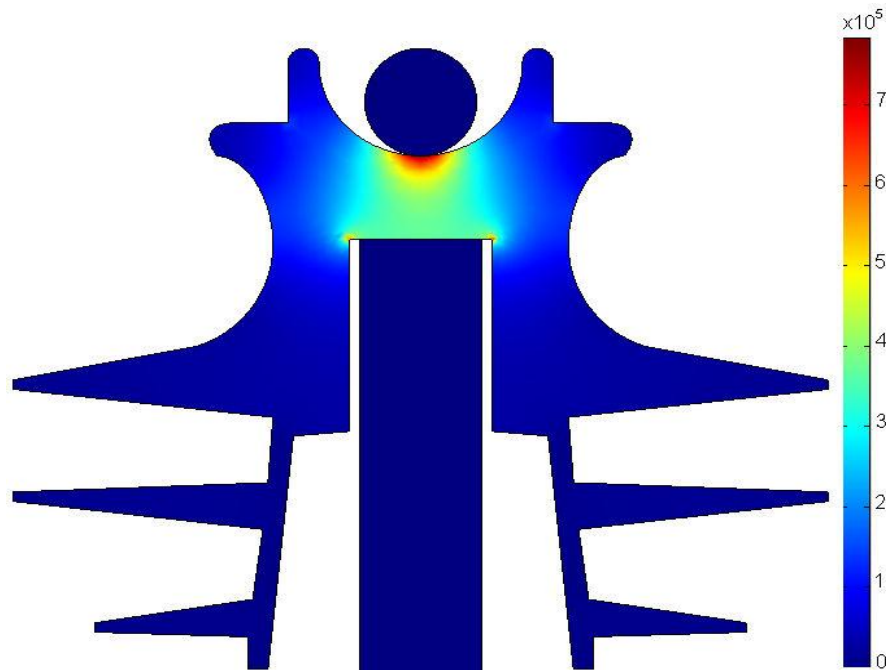
Fonte: Barbosa; Macedo, 2004.

O campo elétrico aplicado e a existência de condições inadequadas, como a pressão do gás no interior do vazio e a penetração da umidade, permitem a ocorrência de descargas parciais dentro do defeito (GODOI et al., 2016; MENDONÇA, 2013). Essas descargas surgem nas cavidades devido à diferença de permissividade dos materiais causando uma distorção no campo elétrico na região. Com o tempo, essas descargas geram a degradação cada vez maior do material isolante, problema que evolui silenciosamente até que ocorra a descarga completa,

rompendo o dielétrico e causando prejuízos maiores ao sistema elétrico de potência. As descargas parciais podem ocorrer na região interna do isolante, descarga parcial interna, na superfície, descarga parcial superficial ou em regiões externas de alta concentração do campo elétrico, conhecido como efeito corona, sendo a descarga parcial interna com o diagnóstico mais difícil, pois seus efeitos não são identificados visualmente, e uma vez identificados o material deve ser substituído imediatamente (BRITO et al., 2016; LOPES, 2018; SUWANASRI et al., 2013).

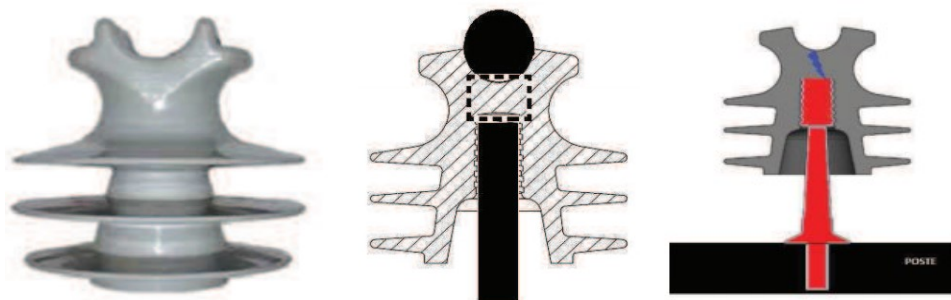
A atividade da PD depende da geometria do vazio no interior do modelo de isolamento sólido. Além disso, a PD aumenta com o aumento da tensão aplicada dentro do isolamento sólido (SABAT, 2011).

Figura 11 - Distribuição de campo elétrico entre o cabo condutor e o pino aterrado



Fonte: FAGUNDES, 2008.

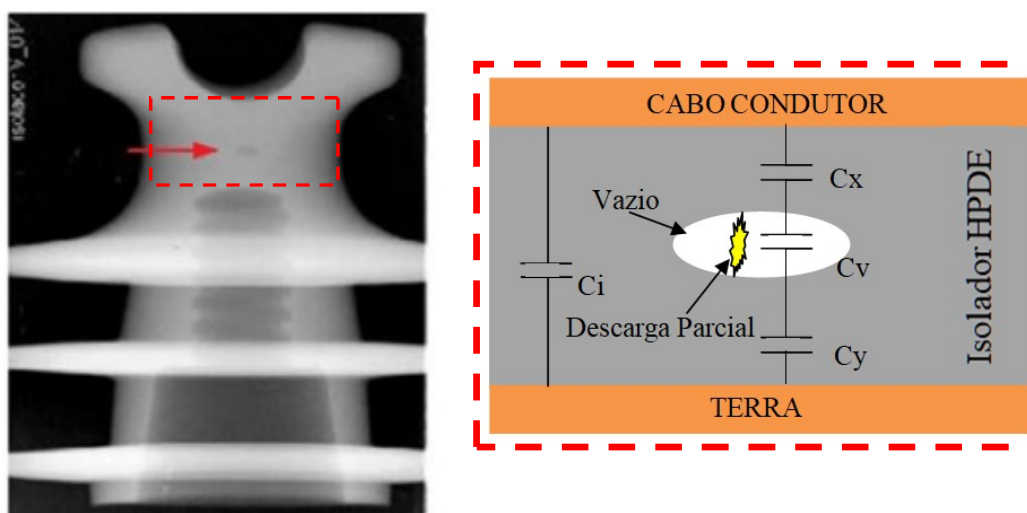
Figura 12 - Ocorrência de *flashunder* entre o cabo condutor e o pino



Fonte: MARTINS, 2015.

Nos isoladores poliméricos, as atividades de DPs ocorrem em cavidades internas preenchidas por ar geralmente à pressão atmosférica. Na figura 13 é possível ver o esquema de uma descarga parcial dentro do isolamento sólido. Quando uma faísca salta a lacuna no vazio cheio de gás, uma pequena corrente flui nos condutores, atenuada pela rede divisora de tensão C_x , C_y , C_z em paralelo com a capacitância a granel C_b (LOPES, 2018).

Figura 13 - Imagem radiográfica de um isolador polimérico de classe 15 kV mostrando a presença de um vazio na parte central entre o cabo condutor e pino aterrado. Do lado direito, mostra um esquema da ocorrência de descarga parcial no vazio em material isolante em função da presença de campo elétrico de alta tensão



Fonte: O Autor, 2020.

Se o estresse de tensão através do vazio for aumentado acima da tensão de início da coroa (CIV) para o gás dentro do vazio, a atividade de PD começará dentro do vazio. Com a ocorrência de descargas parciais sucessivas, o material isolante que reveste essa cavidade começa a se degradar prematuramente, reduzindo a vida útil do isolador, nos casos mais graves pode até levar ao rompimento completo do isolador, gerando um curto-circuito fase-terra (LOPES, 2018). O efeito da descarga é grave para o sistema de isolamento, pois gera energia na forma de calor, sendo a energia térmica a principal razão para a degradação, assim descargas parciais ocorridas repetitivamente é a principal razão para a degradação mecânica e química do material isolante (BRITO, 2016). Uma vez que a PD começa e continua por um longo tempo, se não for tratado, as propriedades de isolamento de tais materiais degradam sua qualidade (SABAT et al., 2011). O PD também pode ocorrer ao longo da superfície de materiais isolantes sólidos se o campo elétrico tangencial da superfície for alto o suficiente para causar uma avaria na superfície do isolador. Esse

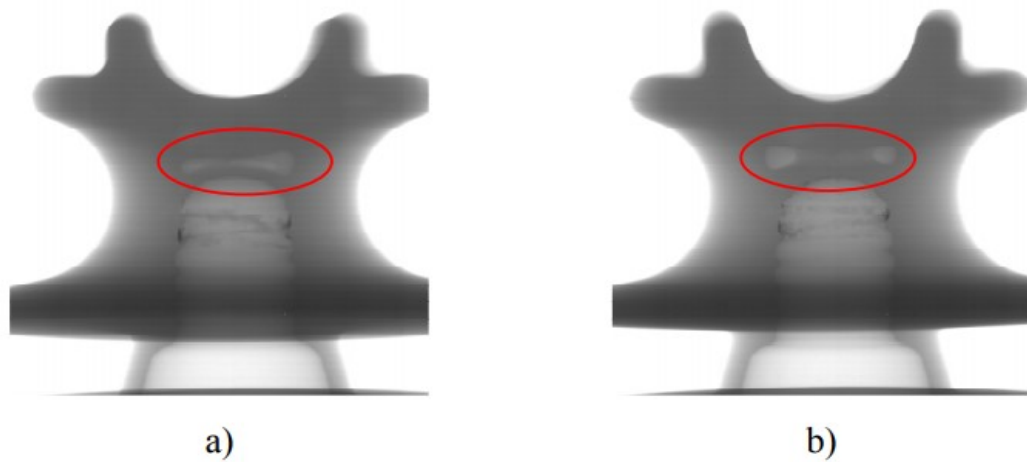
fenômeno geralmente se manifesta em isoladores aéreos, principalmente em isoladores contaminados durante dias de alta umidade. As linhas aéreas usam o ar como meio de isolamento (LOPES, 2018).

O isolador danificado causa o desligamento em definitivo da linha de distribuição, gerando custos de manutenção com a reposição desses componentes e o aumento do tempo de interrupção do fornecimento de energia elétrica aos consumidores, piorando os índices de Duração Equivalente de Interrupção por Consumidor (DEC) e de Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor (FEC) da concessionária, assim necessitando de utilização de técnicas de inspeção para evitar o desligamento (GODOI et al., 2016).

Até ano de 2002 não havia divulgação de resultados sobre inspeção de isoladores elétricos por radiografia no Brasil. Acredita-se que o primeiro trabalho sobre inspeção radiográfica de isoladores elétricos foi divulgado no evento nacional de 6ª COTEQ que ocorreu em 2002 em Salvador-BA, organizado pela ABENDI. Neste evento, primeiros resultados de inspeção de isoladores de vidro com raios-gama e uso de Imaging Plate de alta resolução obtidos na UFPE foram divulgados (SHINOHARA, ACIOLI e KHOURY, 2002). A partir deste trabalho, muitos outros trabalhos foram realizados com uso de imaging plate, resultando inclusive em premiações no País e no exterior (CITENEL 2007 organizada pela ANEEL, WCCM 2017 organizado pelo BINDT, Londres, Inglaterra).

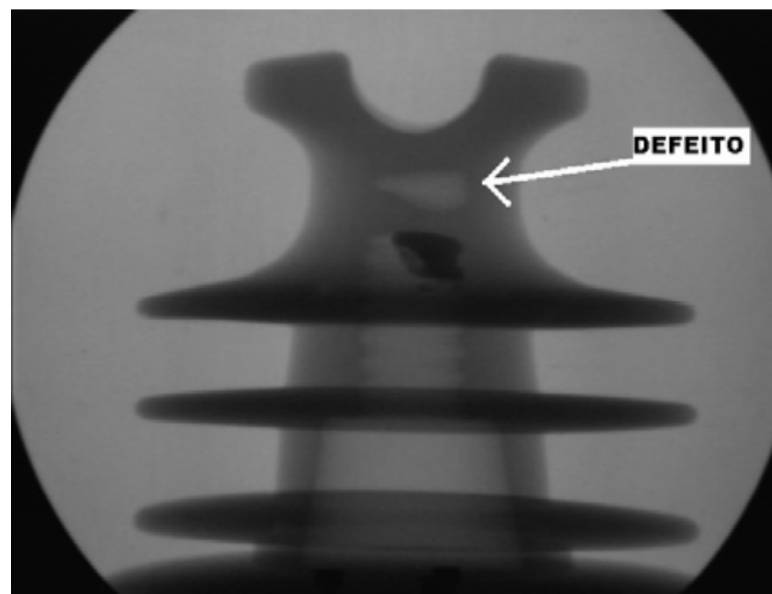
Por exemplo, vários trabalhos de inspeção de isoladores poliméricos com radiografia foram divulgados pelo LACTEC, no centro de pesquisa da COPEL, em Curitiba-PR afirmando que a utilização de radiografia torna possível visualizar os defeitos no interior dos componentes de forma não-destrutiva avaliando a amostra em todo o seu volume (GODOI, 2005; GODOI et al., 2016).

Figura 14 - Radiografia mostrando vazios na região crítica entre cabo condutor e ferragem de fixação



Fonte: FAGUNDES, 2008.

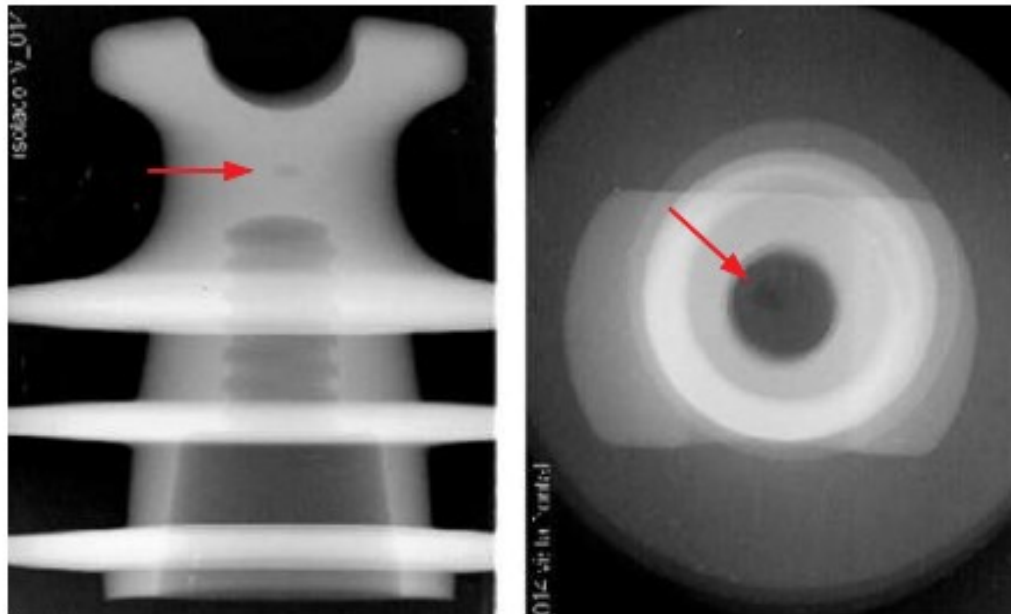
Figura 15 - Vazio detectado no isolador polimérico de classe 15 kV por radiografia digital



Fonte: GODOI, 2016.

Na figura 16, são mostradas imagens de radiografia computadorizada obtida com imaging plate da Perkin-Elmer na UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, mostrando a presença de vazio no isolador polimérico de 15 kV. Este tipo de falha de fabricação pode comprometer a confiabilidade do sistema elétrico, como explicado acima.

Figura 16 - Radiografia computadorizada de isolador polimérico de classe 15 kV



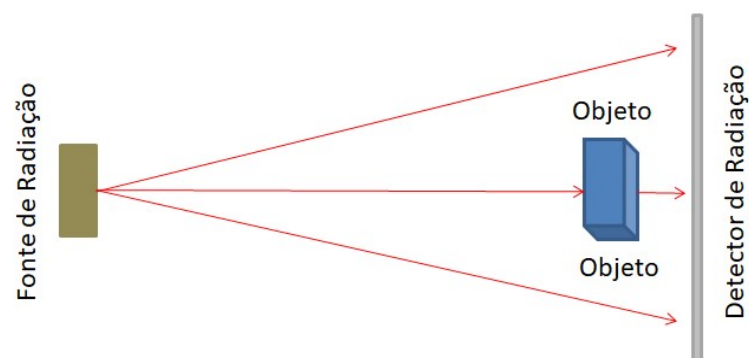
Fonte: SILVA, 2013.

2.2 SISTEMA DE RADIOGRAFIA DIGITAL COM DETETOR IMAGING PLATE

2.2.1 Princípio de radiografia por Absorção

Em radiografia industrial tradicional, o princípio do uso da radiação ionizante para a inspeção de defeitos internos num objeto opacos de interesse mantém-se inalterado há mais de 120 anos, desde a descoberta dos raios-X e a configuração é mostrada esquematicamente na figura 17, e entre a fonte de radiação e o detector de imagem, é posicionado o objeto a ser inspecionado.

Figura 17 - Esquema típico de radiografia pelo método de absorção



Fonte: O Autor, 2020.

Em termos de procedimento para a obtenção de imagem radiográfica, além do objeto a ser inspecionado ficar posicionado entre uma fonte de radiação ionizante (raios-X, raios- γ) mas próximo ao detector de imagem devido ao efeito da penumbra, há necessidade de deixar um determinado tempo em exposição. Atualmente, existem variados tipos de detetores tais como filme de raios-X, *Imaging Plate* (IP), ou detector eletrônico, por exemplo, *flat panel*. Este método de obter as imagens radiográficas do objeto de interesse é conhecido também como método de absorção, onde uma parte da radiação atravessa, e a outra parte é absorvida pelo processo de atenuação.

Atualmente, sabe-se que a radiação ionizante (raios-X e raios- γ) são ondas eletromagnéticas de mesma natureza da luz visível, mas de comprimento de onda muito menor, da ordem de ângstron (10^{-10}m), mas com a propriedade interessante de conseguir atravessar corpos opacos à luz visível e revelar o seu interior, por exemplo, existência ou não de vazios. Ademais, possui a capacidade de ionizar os átomos de gases, líquido e materiais sólidos. Sabe-se também que a radiação ionizante atravessa com maior facilidade materiais de menor densidade, pois, a habilidade de penetrar em materiais depende basicamente do comprimento de onda da radiação eletromagnética, " λ ", do número atômico " Z " que constitui o material a ser inspecionado e da densidade do material, " ρ ". De acordo com a teoria quântica proposta por Planck, a energia dos fótons " E " é dada pelas equações 1 e 2.

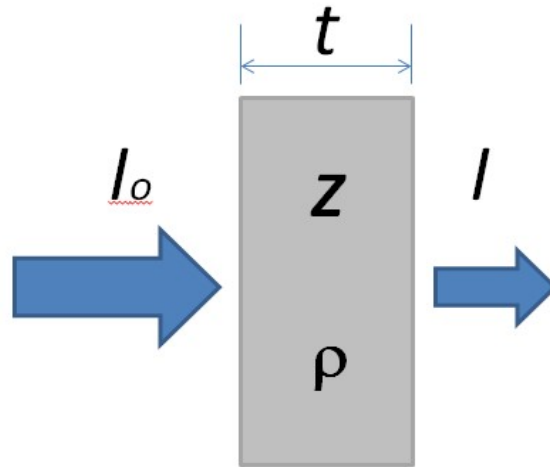
$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (1)$$

$$E \text{ (keV)} = 12,4/\lambda(\text{\AA}) \quad (2)$$

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 da radiação.

Assim, quando a radiação ionizante incide no objeto de interesse, uma parte atravessa, mas a outra parte é absorvida devido à interação da radiação ionizante com a matéria do objeto. Esquematicamente, é mostrado na figura 18.

Figura 18 - Esquema sobre intensidade de radiação incidente e transmitida



Fonte: O Autor, 2020.

A relação matemática entre as intensidades de radiação transmitida (I) e incidente (I_0) é dada pela lei de Beer-Lambert, equação (3):

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (3)$$

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

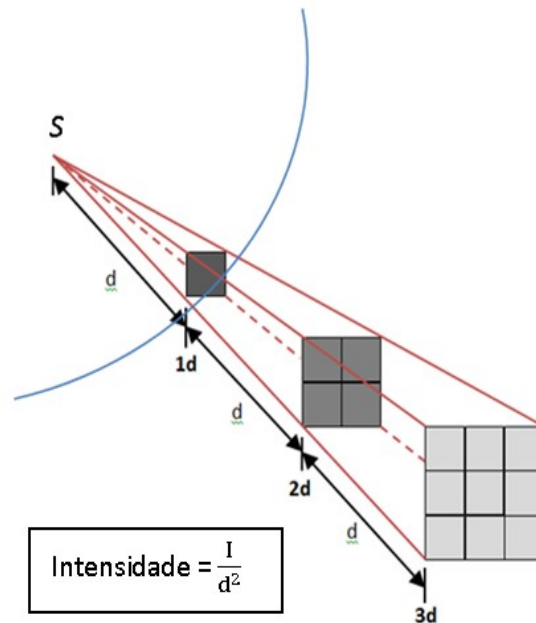
Ademais, sabe-se que quando a radiação ionizante gerada numa fonte de radiação propaga-se pelo ar, a sua intensidade por área diminui de acordo a lei do inverso de distância de Newton, dada pela equação (4), a intensidade cai com o quadrado da distância, como é ilustrado na figura 19. A rigor, a referida área é esférica e a intensidade (I') da radiação numa determinada posição do espaço é dada pela equação (5).

$$I_1 \times d^2 = I_2 \times d^2 \quad (4)$$

$$\frac{S}{2\pi d^2} = I' \quad (5)$$

Onde “ S ” é a intensidade da radiação na origem da fonte de radiação e “ $2\pi d^2$ ” é a área da esfera e “ d ” é a distância numa determinada posição da fonte de radiação.

Figura 19 - Lei de Newton sobre diminuição da intensidade da radiação com o quadrado da distância.
 “S” é a intensidade de radiação na origem da fonte



Fonte: NDT Resource Center.

Para obter imagem radiografia de alta qualidade, a distância mínima que deve ser mantida entre a fonte de radiação e o detetor de imagem, de acordo com a literatura e a norma ISO 5579 (Non-destructive testing – Radiographic testing of metallic materials using film and X-or gamma rays – Basic rules) é estabelecida pela equação (6):

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

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 detetor é dada por (a + b).

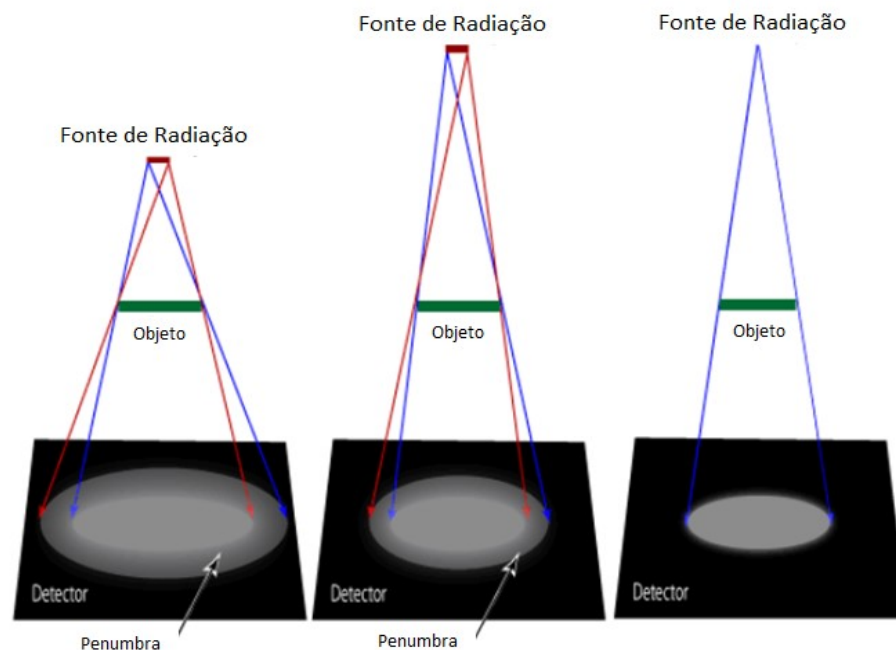
A formação de imagem radiográfica é um processo de alta complexidade, mas basicamente, ocorre devido ao contraste da passagem do feixe direto da radiação pelo objeto e também pela radiação espalhada resultante da interação da radiação com a matéria durante a sua passagem, que reduz o contraste devido o seu comportamento como ruído.

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

- a) Penumbra geométrica, U_g , devido à dimensão da origem da fonte de radiação (ponto focal) e distância ao objetivo a ser inspecionado;
- b) Penumbra do filme, U_f , devido ao espalhamento dos elétrons no filme, Imaging Plate;
- c) Penumbra devido ao intensificador de imagem (écran), U_s , causado pelo espalhamento da luz na camada fluorescente;
- d) Penumbra devido ao movimento, U_{mv} , devido ao movimento relativo do objeto e filme de raios-X ou detector de radiação.

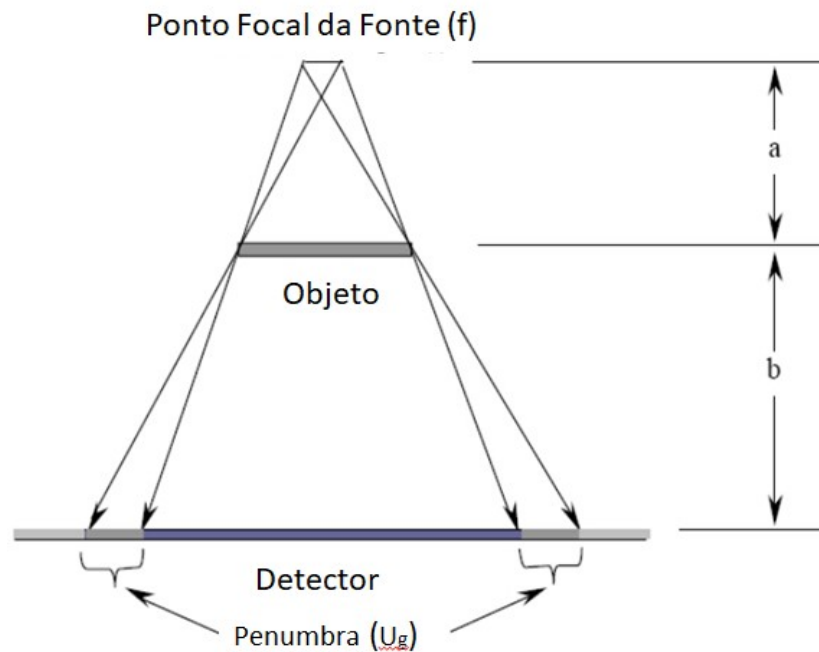
Visando obter imagem radiográfica de alta resolução espacial, reduzir o efeito da penumbra geométrica, U_g , é uma prática interessante, que pode ser realizado através do afastamento ao máximo a fonte de radiação do objeto de interesse a ser inspecionado, como mostra esquematicamente as figuras 20 e 21. Neste caso, mantendo o mesmo tamanho focal ocorre a redução da penumbra geométrica, mas compromete a intensidade de radiação devido à forma de propagação cônica discutido anteriormente demonstrando que a intensidade da radiação diminui ao quadrado da distância.

Figura 20 - Esquema de penumbra gerada de pelo tamanho focal na origem da fonte de radiação quando a dimensão é finita. Portanto, para aumentar a capacidade de resolução em termos de contraste do sistema radiográfico, afastar a fonte de radiação do objeto de interesse é estratégico



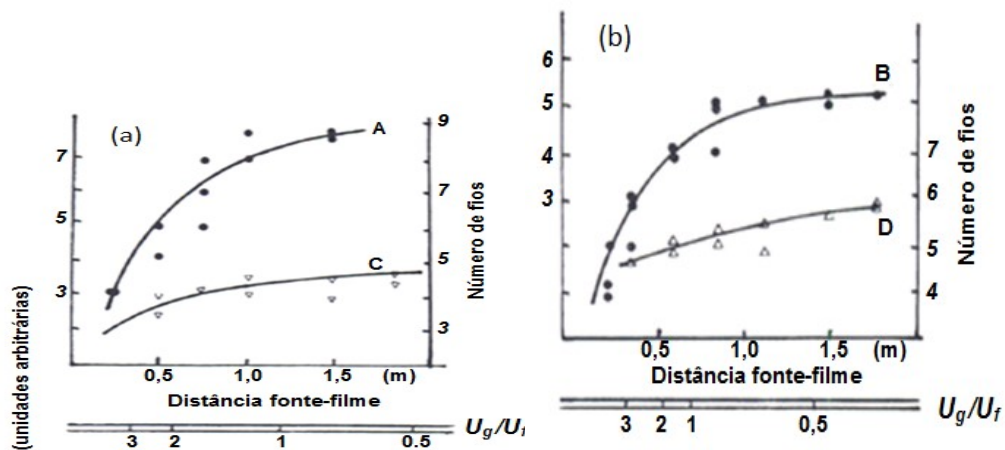
Fonte: NDT Resource Center.

Figura 21 Esquema para calcular a dimensão da penumbra geométrica (U_g)



Fonte: NDT Resource Center.

Figura 22 - Efeito da distância entre a fonte de radiação e o filme de raios-X no discernimento da trinca. Quanto maior a distância da fonte de radiação, maior o discernimento. Esquema (a) refere-se uma amostra de aço de 25 mm de espessura, uso de raios-X e filme tipo MX da Kodak. O esquema (b) refere-se uma amostra de aço de 75 mm de espessura, fonte de radiação de ^{60}Co e filme Agfa D-7. Curvas A e B são para trincas e C e D para fios



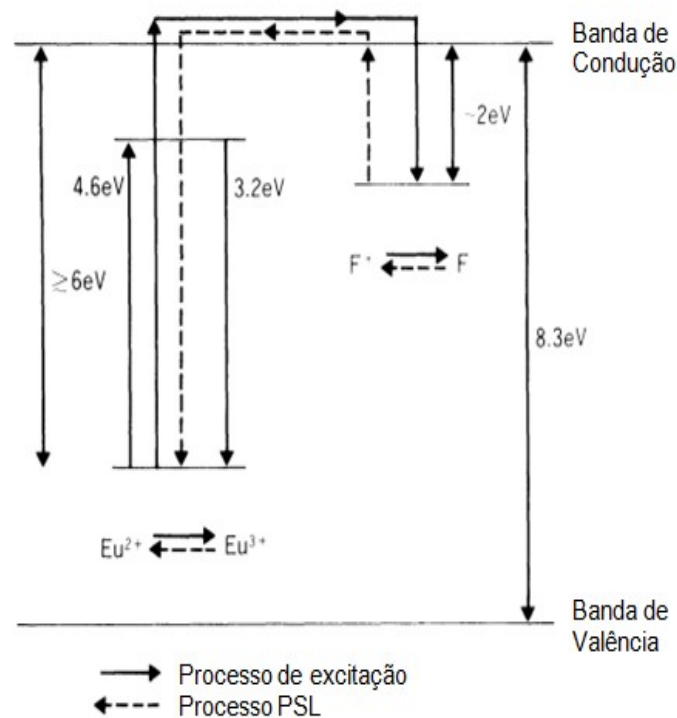
Fonte: HALMSHAW, 1995.

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 1ms. 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.

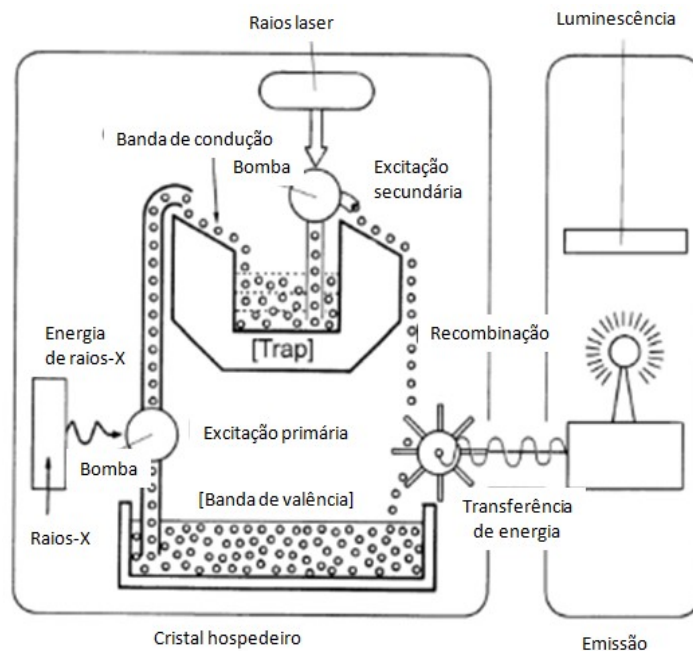
Na década de 1980, visando aplicação médica, a FujiFilm, no Japão, desenvolveu um detector inovativo bidimensional para uso em radiografia, denominado de *Imaging Plate* (IP), empregando o fenômeno de luminescência de cristais (BaFBr:Eu^{2+}) (MIYAHARA, 1987). O mecanismo de funcionamento é mostrado na figura 23.

Figura 23 - Mecanismo de funcionamento do IP. Luminescência foto-estimulada (PSL). Mecanismo de - BaFBr:Eu^{2+} . É o mesmo mecanismo para BaFCl:Eu^{2+} e para BaFI:Eu^{2+}



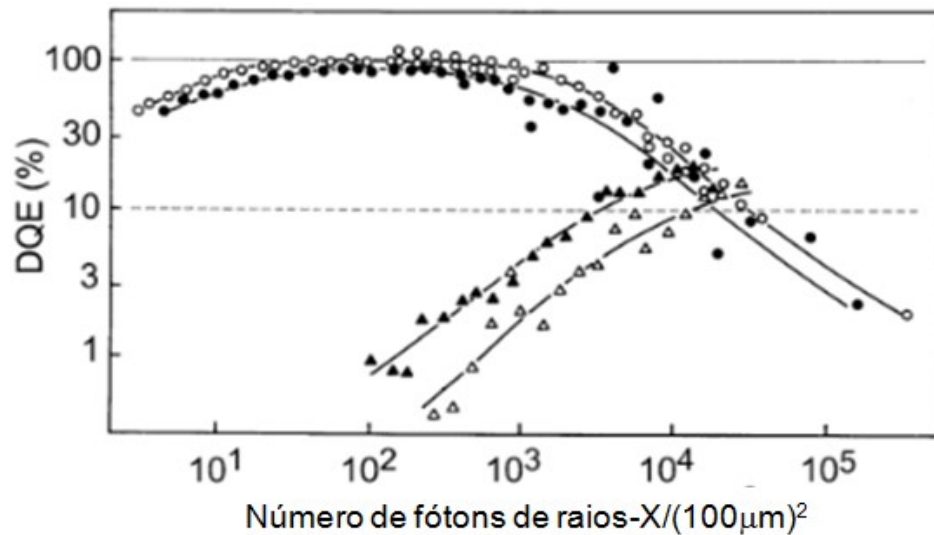
Fonte, MIYAHARA, 1987.

Figura 24 - Explicação didática sobre o funcionamento do IP fazendo analogia com uma bomba hidráulica e tanque de água. Mecanismo de luminescência foto-estimulada



Fonte: AMEMIYA et al., 2006.

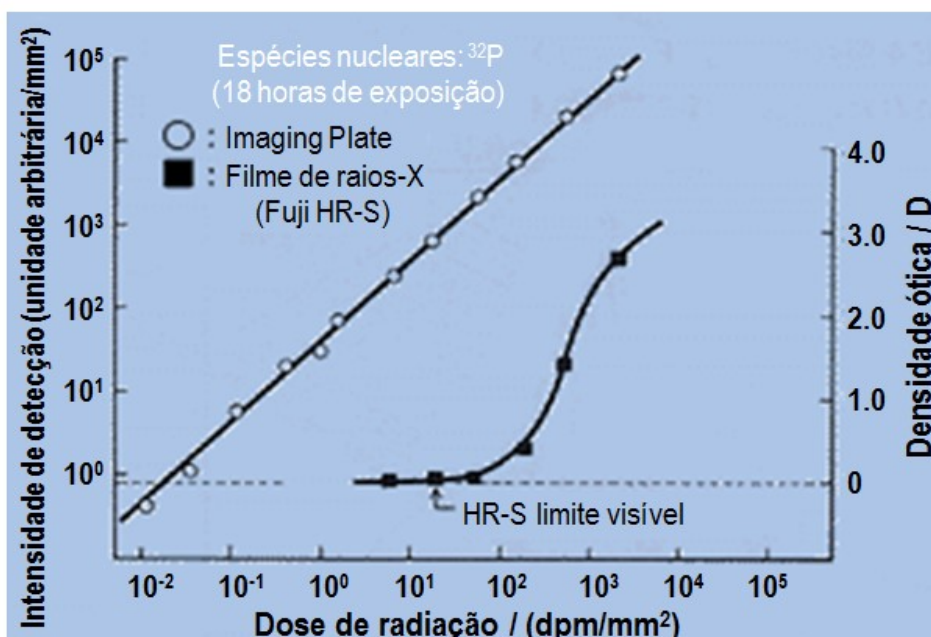
Figura 25 - Detective Quantun Efficiency da placa de imagem PSL-IP



Fonte: AMEMIYA E MIYAHARA, 1988.

Para desenvolvimento da presente dissertação, buscou-se a explorar a excepcional sensibilidade da tecnologia do detector de imagem radiográfica Imaging Plate (IP), que possui em relação ao filme de raios-X tradicional, como mostra a figura 26.

Figura 26 - Mostra a excepcional sensibilidade do Imaging Plate (IP), com duas a três ordens superiores em relação ao filme de raios-X, além da linearidade (faixa dinâmica)



Fonte: FUJIFILM

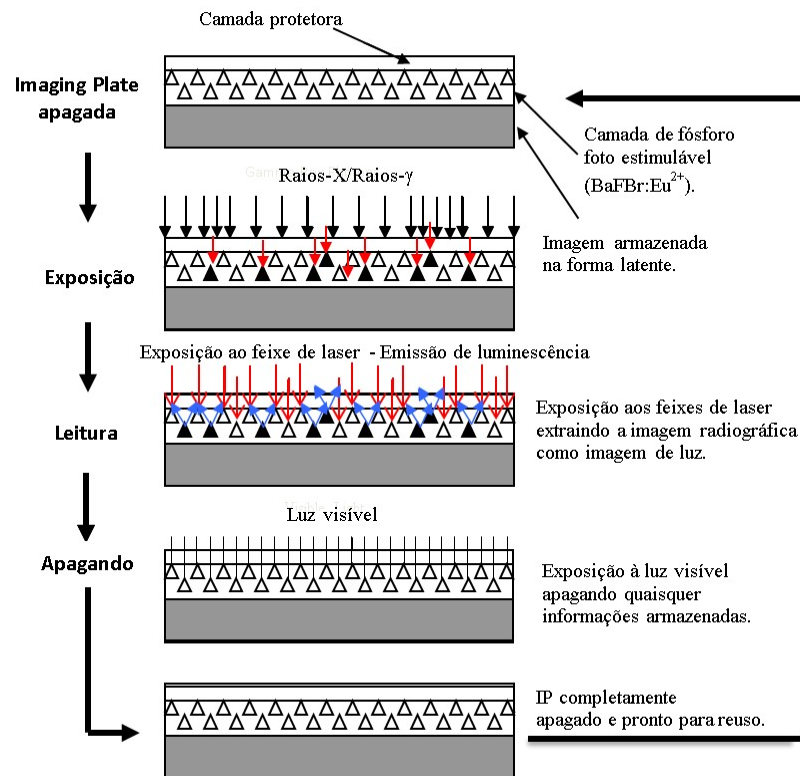
O detector IP possui mesclas das características dos detectores de pulso e integral. Em 1985, as características do IP foram detalhadamente investigadas e testadas como detector de raios-X nas técnicas de difração para estudos de estruturas cristalinas de materiais biológicos com sucesso, que apresentam naturalmente baixa intensidade de difração, espalhamento de raios-X com radiação síncrotron 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 revelar, fixador como requer o filme de raios-X convencional. A figura 26 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 ³²P (radiação beta de energia $E = 1,7 \text{ MeV}$).

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.

Na figura 27 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 2016). 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, o mesmo 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.

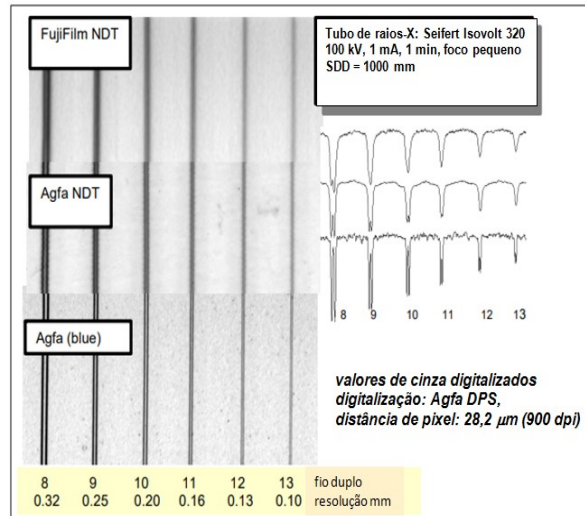
Figura 27 - Procedimento simplificado de processamento do uso e reuso do Imaging Plate (IP): exposição, leitura, apagamento e reuso



Fonte: SHINOHARA et al., 2002.

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

Figura 28 - Resolução do IP em função do tipo de IP e escâner a laser utilizado para leitura



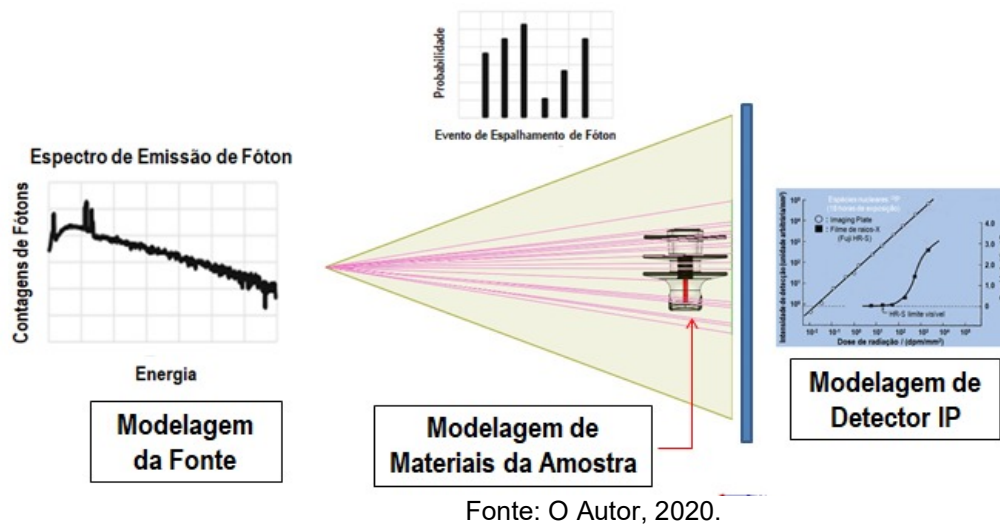
Fonte: EWERT et al., 2007.

2.3 TEORIA BÁSICA DE FORMAÇÃO DA IMAGEM RADIOGRÁFICA E MODELAGENS ADOTADAS PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA ATRAVÉS DE SOFTWARE CIVA-RT

Para descrever as bases teóricas e as modelagens utilizadas para simular virtualmente a radiografia digital de um software dedicado e comercial, as seguintes literaturas foram consultadas (KELLER, PESSIKI, 2015; TISSEUR et al., 2014; CIVA USER MANUAL, 2011; FERNANDEZ E SCHUMM; 2009; JAENISCH, BELLON E EWERT, 2010; LEMAIRE et al., 2016). Atualmente, existem comercialmente softwares de simulação numérica de radiografia industrial tais como CIVA-RT, aRTist, mas existem também software de simulação gratuita tais como PENELOPE (SEMPAU et.al., 1997), MCNPX (MNCP).

Na presente dissertação, foi utilizado o software comercial CIVA-RT, versão 11.0, que leva em consideração todo o sistema radiográfico, desde a fonte de radiação até o detector que pode ser filme de raios-X, Imaging Plate. Na sua biblioteca possui modelos de fonte de radiação, modelagens da interação de radiação com a matéria de forma e através de espalhamento, modelagem de detector de radiação e imagem radiográfica, como mostra a figura 29.

Figura 29 - Três componentes principais na modelagem computacional para obter imagens radiográficas virtualmente



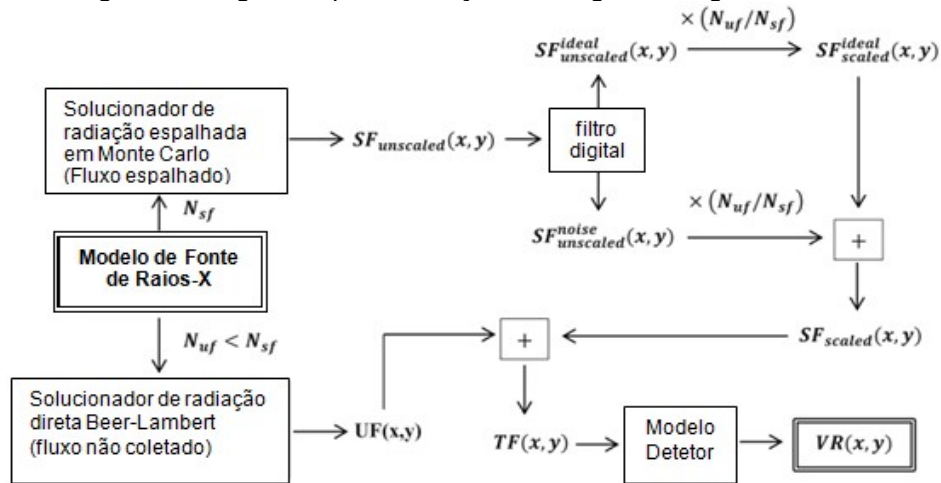
A capacidade de realizar imagens radiográficas para inspeção não destrutiva de objetos de geometrias de alta complexidade, materiais heterogêneos, compósitos, torna-o um método de inspeção da integridade estrutural bastante eficaz e versátil para visualização do seu interior para avaliação das condições internas dos objetos de interesse. Como um meio de avançar na inspeção radiográfica de situações de alta complexidade, como por exemplo, de partes energizadas com alta e extra-alta tensão apresenta elevado risco de vida às equipes de linha energizada, avaliar a probabilidade de detecção (POD) de defeitos de uma determinada dimensão, o desenvolvimento e a utilização de softwares de radiografia virtual por simulação numérica que de fato possa simular imagens radiográficas de forma realística, é uma ferramenta de pesquisa e aplicação industrial importante para otimizar as práticas de ensaios radiográficos em laboratórios para sua validação e estabelecer procedimentos de inspeção em campo, aprimorar o método de inspeção em vez de tentativas e erros.

O simulador CIVA-RT pode calcular a radiação direta e espalhada produzida pela interação da radiação gerada a partir de uma fonte de raios-X ou raios-gama. O usuário pode definir a configuração de controle tais como seleção de objeto projetado em CAD para ensaio virtual de radiografia.

A radiografia virtual final é obtida pela combinação de resultados do solucionador de radiação direta Beer-Lambert e do solucionador de radiação espalhada por Monte Carlo. Uma ilustração esquemática do procedimento é

mostrada na figura 30. A simulação direta de radiação é realizada primeiro. Esta simulação gera uma imagem para o fluxo não coletivo, usando a fluência real (número de fótons emitidos) com base nas configurações da fonte de raios-X (N_{uf}). Conforme observado na Seção 2.3, a simulação direta de radiação leva em consideração o desfoque geométrico. A distribuição espacial da energia do fóton que atinge a superfície do detector é calculada e definida como a imagem de fluxo não colidido ($UF(x, y)$), onde x e y define um ponto único ao longo da superfície do detector em coordenadas cartesianas. Em seguida, são realizadas duas simulações não correlacionadas de Monte Carlo, cada um usando uma fluência igual à metade do número especificado de fótons (N_{sf}) especificado pelo usuário, que geralmente é significativamente menor que o número de fótons considerados na simulação direta de radiação. A energia que atinge a superfície do detector nas duas simulações de radiação espalhada é combinada para obter a imagem de fluxo disperso não dimensionado ($SF_{unscaled}(x, y)$). Usando um filtro digital (Hanning ou Butterworth), a imagem de fluxo disperso não dimensionado é então decomposta em uma imagem de fluxo disperso idealizada (sem ruído) ($SF_{unscaled}^{ideal}(x, y)$) e em um componente de ruído associado ($SF_{unscaled}^{noise}(x, y)$). A imagem de fluxo espalhada idealizada e o componente de ruído associado são então redimensionados para a imagem de fluxo não coletada usando um fator de normalização igual à razão de N_{uf} para N_{sf} . A imagem de fluxo disperso idealizado em escala resultante ($SF_{scaled}^{ideal}(x, y)$) é adicionada ao ruído em escala componente ($SF_{scaled}^{noise}(x, y)$) para formar a imagem de fluxo disperso dimensionado ($SF_{scaled}(x, y)$). A imagem de fluxo disperso em escala é então adicionada à imagem de fluxo não coletado para gerar a imagem de fluxo total ($TF(x, y)$), que contém a distribuição espacial da energia do fóton na superfície do detector. Essas informações são usadas como entrada para a modelagem do detector para determinara imagem radiográfica virtual final ($VR(x, y)$), que contém a distribuição espacial da resposta do detector (por exemplo, se for filme de leituras de densidade óptica para filme radiográfico)

Figura 30 - Algoritmo para obtenção de imagem radiográfica virtual

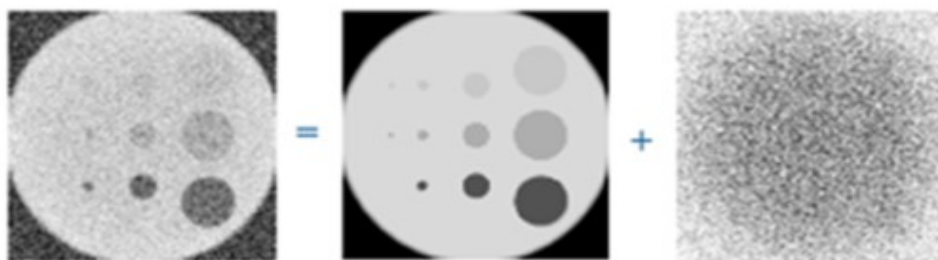
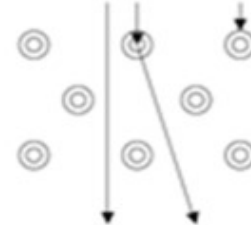


Fonte: KELLER AND PESSIKI, 2015.

A figura 31 ilustra esquematicamente o efeito da radiação espalhada após a passagem de radiação pelo objeto de interesse, que não carrega informações sobre a estrutura interna.

Figura 31 - Efeito da radiação espalhada pela matéria na redução do contraste

- Radiação direta gera contraste na imagem
- Radiação espalhada reduz o contraste



Fonte: FERNANDEZ E SCHUMM, 2009.

2.3.1 Modelagem do Detector de Imagem Plate (PSL-IP)

A utilização do filme de raios-X ainda é considerada o método de detecção de radiação mais amplamente empregado em radiografia industrial e, portanto, é considerado o detector de referência com o qual as outras técnicas de detecção de radiação devem ser comparadas, apesar dos novos detectores digitais possuem

uma série de vantagens em relação ao filme de raios-X tradicional tais como manuseio, redução de tempo de exposição e tempo total de retorno de investimento, custo operacional, riscos à radiação etc., e tem mostrados sucessos em aplicações médicas, onde substituíram quase que completamente o filme de raios-X em hospitais e posteriormente, vem sendo aplicados no setor industrial.

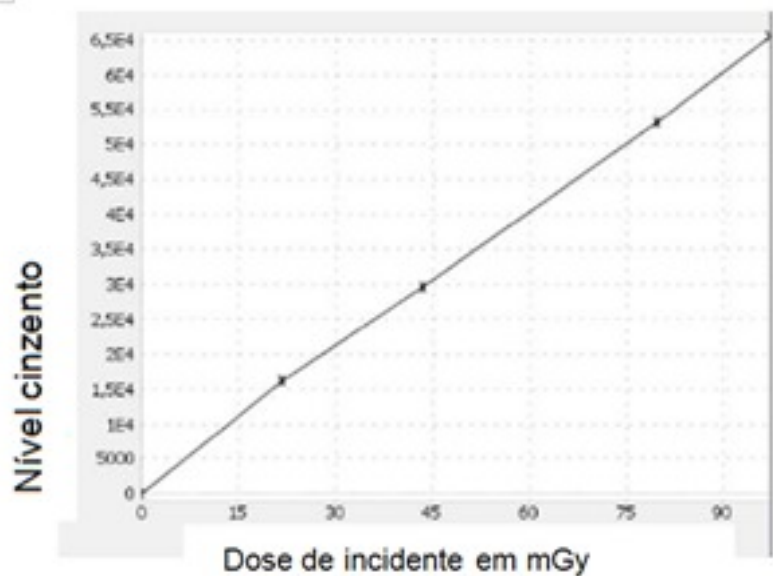
Dentre as opções disponíveis de detectores digitais, as placas de imagem denominadas de Imaging Plate foto-estimulável (PSL-IP) aparecem como os substitutos mais diretos dos filmes de raios-X, devido a sua semelhança no manuseio, substituindo a parte sensora do filme de raios-X por uma camada de material foto estimulável anteriormente descrito, mas mantendo as demais partes do sistema do detector. A flexibilidade da placa de imagem torna-a particularmente atraente para aplicações em inspeção de tubulações, por exemplo, pois pode ser curvada em torno de uma solda como faz com o filme de raios-X tradicional. Após a exposição, a imagem latente armazenada na parte sensora do PSL-IP é lido com um escâner a laser para obter as imagens através estimulação óptica de luminescência, a qual é emitida coletada e amplificada por um tubo foto multiplicador (PMT), convertido em sinal digital através de um conversor ADC, fornecendo assim uma imagem digital no monitor do workstation.

Por outro lado, a modelagem do detector de imagem radiográfica é definida pela relação entre a resposta do detector à exposição da radiação. Para melhor compreensão sobre modelagem do Imaging Plate, primeiramente, é feita a revisão sobre a resposta do detector tradicional de imagem radiográfica. Para filme de raios-X, quando a parte foto-estimulável é exposta á radiação ionizante, ocorre a liberação de íons dos cristais de haleto de prata suspensos na emulsão gelatinosa do filme. Os íons liberados formam novos compostos que são sensíveis à solução química do revelador. A reação química forma prata metálica preta no interior da emulsão gelatinosa. O enegrecimento é influenciado pela quantidade de radiação incidente. O valor medido de densidade óptica do filme de raios-X após a revelação expressa arelação com intensidade incidente de radiação exposta. A implementação numérica do modelo de um detector é baseada na seguinte aproximação. A primeira consideração é a probabilidade de cada fóton que chega ao detector de interagir com a camada foto-estimulável do detector. A energia absorvida é então transformada num sinal baseado na relação exposição-resposta para determinado detector. Para filmes de raios-X usualmente empregados, a densidade óptica é

constante na norma européia EN584 (SCHUMM E ZSCHERPEL, 2007), que é a norma para classificação de filmes de radiografia industrial e uso em modelamento de radiografia. E com respeito ao ruído do detector está relacionado com o tamanho dos grãos dos cristais de haleto de prata.

A resposta do detector de radiação Imaging Plate (IP) à radiação é mostrada na figura 32.

Figura 32 - Função quase linear entre a dose e tom de cinza para Ir-192



Fonte: LEMAIRE et.al., 2016.

Nesta modelagem, um ruído global do sistema de detecção é utilizado. O desvio padrão do ruído global em função do ganho (G), a imagem de variação ($\sigma_{E_{abs}}$) e a eficiência de detecção quântica (DQE) é dada pela equação:

$$\sigma_{signal}^2 = G^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{E_{abs}}^2}{DQE} \right) \quad (7)$$

O DQE leva em consideração todos os fenômenos tais como:

- ruído fotônico;
- ruído da detecção dos parâmetros de inspeção radiográfica.

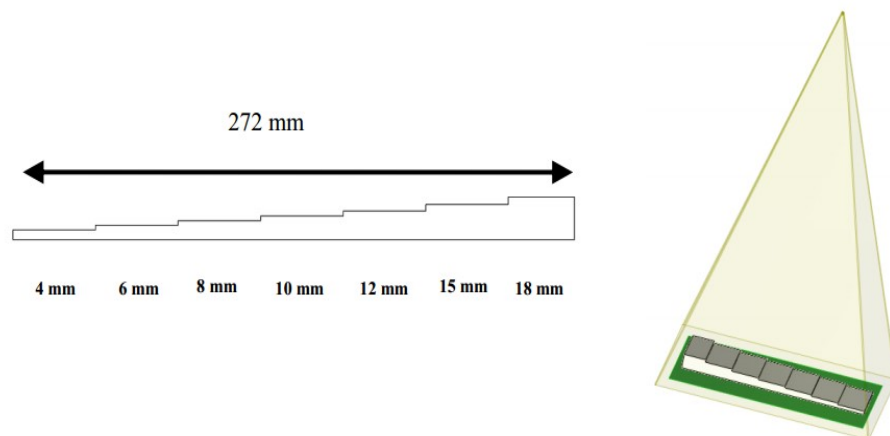
Para modelar o detector de radiação da placa de imagem (IP) no CIVA-RT, dois tipos de placas de imagens pode ser selecionados: alta sensibilidade Kodak HS e alta resolução HR, foram caracterizadas usando a abordagem de Monte Carlo, como descrita acima. Para cada placa de IP sem filtro e uma gama de filtros de chumbo entre 0,1 mm e 0,4 mm foram caracterizados e os coeficientes de absorção

tabulados implementados no CIVA-RT. Uma outra caracterização diz respeito à pilha de filtros de 1,5 mm de chumbo e 0,5 mm de aço. O modelo foi validado usando os escâneres da Durr e GE, empregando os seguintes parâmetros nos experimentos e na simulação:

- Fonte de radiação de Ir-192 de 3x3mm
- Distância do detector a fonte de 500mm
- IQI de cunha de degraus em aço ferrítico com 7 espessuras diferentes (4 mm a 18mm)
- 0,2 mm Pb + IP HR da Kodak
- Escâner da Dürr NDT CR35 com tamanho de pixel de 50 μ m

A figura 33 resume a configuração para validação.

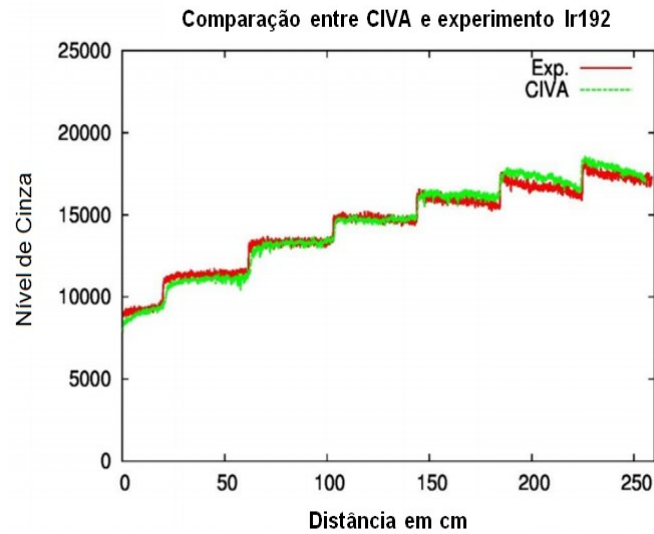
Figura 33 - Configuração de validação com cunha de degraus de aço ferrítico



Fonte: TISSEUR et al., 2014.

A Figura 34 mostra o perfil do valor de cinza obtido no experimento e na simulação, e o erro é inferior a 5% em termos de nível de cinza.

Figura 34 - Perfis de valor de cinza obtidos ao longo do passo cunha com CIVA e experimentalmente



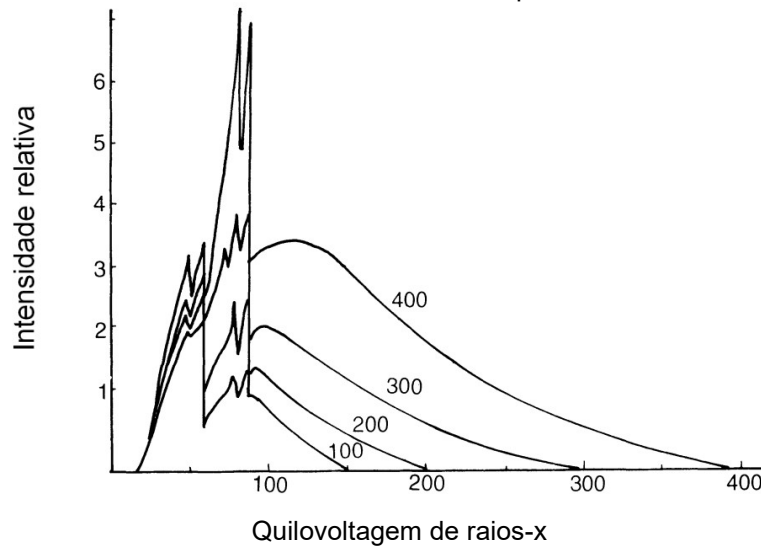
Fonte: TISSEUR et al., 2014.

2.3.2 Modelagem da fonte de raios-X

A modelagem de uma fonte de raios-X é definida por um espectro de emissão de fótons, número de fótons emitidos para cada canal de energia, emanando de um ponto discreto ou sobre uma área focal específica. Do ponto de vista operacional do software, o espectro de emissão pode ser definido pelo usuário a partir de dados medidos, desenvolvido usando um modelo semi-empírico com base na configuração do tubo (por exemplo, material do ânodo, orientação ao alvo e tensão de aceleração) ou pode ser selecionado em uma biblioteca pré-carregada de espectros de emissão para geradores de transmissão e de raios-X do tipo reflexão. Para implementação numérica, o espectro de emissão de fótons é discretizado em compartimentos de canal de energia, cada um com um nível de energia associado e contagem de fótons. A filtragem é modelada analiticamente através do módulo do espectro de emissão ou explicitamente através da construção de representações físicas dos materiais do filtro.

Portanto, as literaturas consultadas mostram que uso das bases teóricas se as modelagens empregadas no simulador de radiografia computadorizada CIVA-RT V.11 permitem reproduzir uma imagem radiográfica próxima da radiografia real.

Figura 35 - Curvas de distribuição de energia-intensidade experimentais suavizadas para raios X de 100, 200, 300 e 400 kV, obtidas com espectrômetro de cintilação



Fonte: HALMASHAW, 1995.

2.3.3 Solução de beer – lambert para radiação direta

O primeiro solucionador empregado pelo CIVA-RT para a execução da simulação de radiografia virtual, inicialmente, calcula a radiação direta absorvida de acordo com a lei de Beer-Lambert pela equação (8), que define uma relação entre o número de fótons emitidos em um nível de energia específico (I_0) e a fração dos fótons emitidos que são transmitidos através do material (I), atingindo o detector na superfície oposta.

$$N_t = N_i \exp(-\mu \cdot L) \quad (8)$$

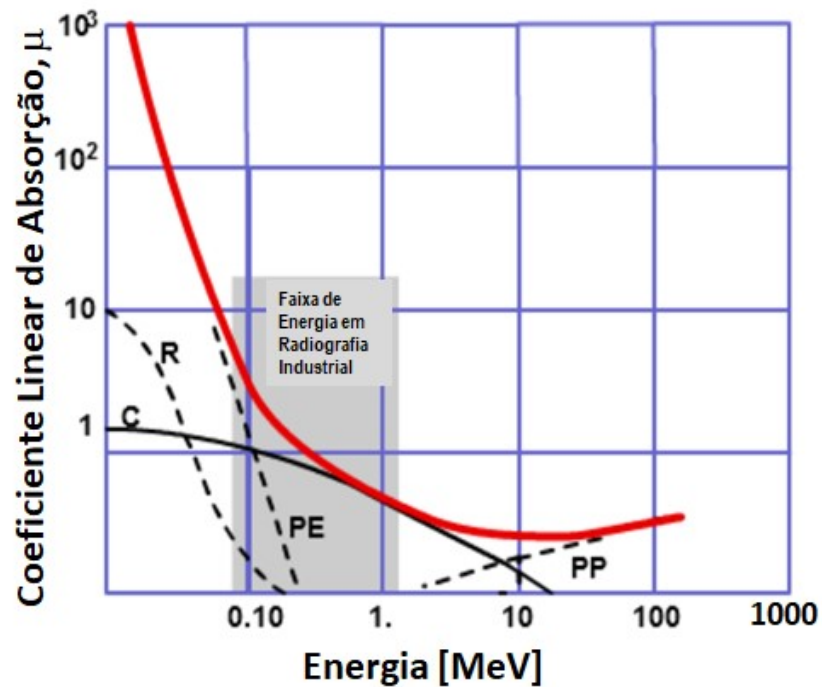
Na equação (8), μ é um coeficiente de atenuação dependente da composição do material e da energia de emissão de fótons e “ t ” é a distância em linha reta que o fóton viaja através da amostra da fonte até um local específico na superfície do detector. L é um parâmetro mensurável com base na geometria da amostra e na configuração do teste. Para o parâmetro de atenuação μ , os espectros do coeficiente de atenuação (atenuação em função da energia do fóton) para elementos químicos, compostos e misturas são fornecidos na literatura.

Para cada canal de energia no espectro de emissão de fótons, uma radiografia virtual é gerada de acordo com (8) e o modelo de detector associado. As radiografias específicas do canal são então combinadas para formar a radiografia final por radiação direta. Para o modelo de fonte de raios-X de ponto discreto, o desfoque geométrico é modelado assumindo uma distribuição gaussiana. A dimensão típica usada pelo modelo de desfoque geométrico corresponde à verdadeira dimensão focal do raios-X multiplicado por um fator de ampliação médio.

2.3.4 Determinação da radiação espalhada por Monte Carlo

O segundo solucionador modela o espalhamento de radiação no objeto sob a inspeção usando uma simulação de Monte Carlo. Nesta abordagem, um segundo nível de comportamento probabilístico é atribuído aos pontos de material distribuídos espacialmente. Além da probabilidade associada ao encontro de um elemento específico, os processos de colisão de fótons associados a esse elemento e a energia incidente do fóton, ou seja, absorção fotoelétrica, espalhamento de Compton, espalhamento de Thomson ou criação de pares, também recebem uma probabilidade de ocorrência. Durante a simulação, os fótons individuais se movem através da amostra, de e para os pontos do material, em um processo de caminhada aleatória, começando no ponto de interseção entre a trajetória idealizada do fóton em linha reta e a superfície exposta da amostra. Em cada ponto do material, uma colisão específica. O processo é modelado baseado na probabilidade de evento assumida. Note-se que o código de dispersão de fótons de Monte Carlo no CIVA-RT é paralelo para uma implementação eficiente em estações de trabalho (Workstation) com vários núcleos de processadores. A Figura 36 mostra a atenuação total da interação da radiação com a matéria, no caso para ferro.

Figura 36 - Relação energia em função do coeficiente de atenuação linear para material ferro

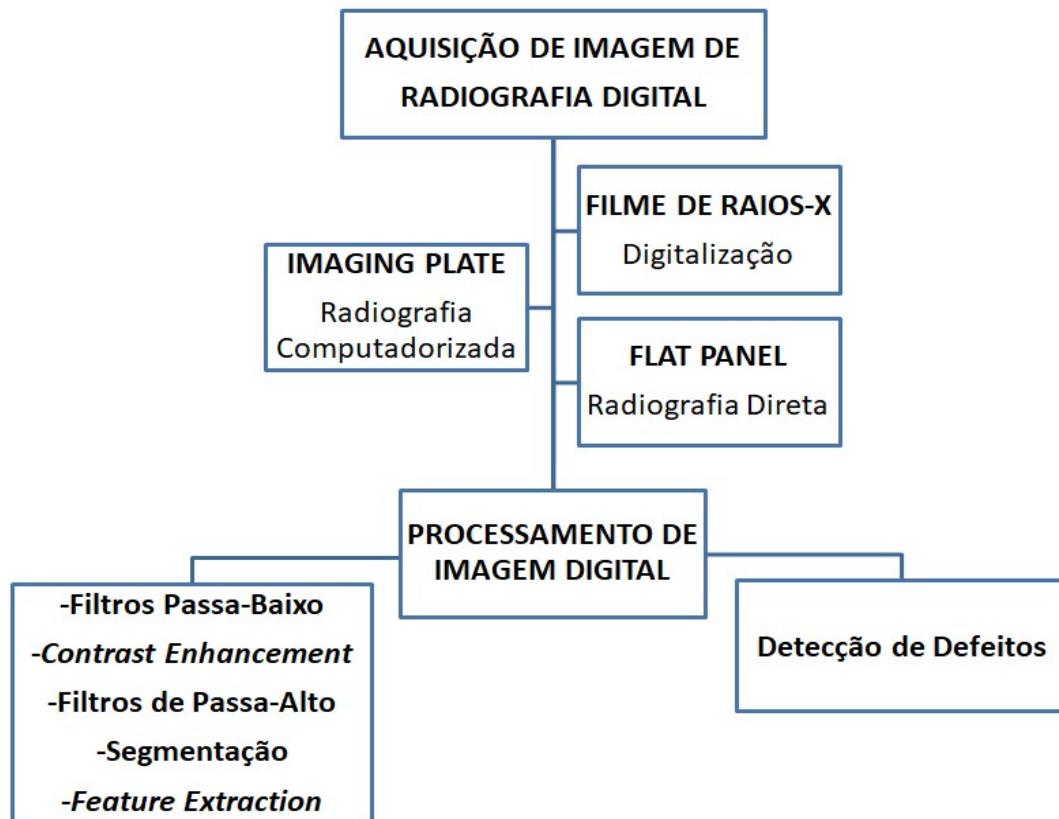


Fonte: NDT Resource Center.

2.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAL

Basicamente, o processamento de imagem na Radiografia Computadorizada (RC) possui 2 estágios distintos (ROBERTS e GRAHAM, 2001; SILVA e MERY, 2006): (i) aquisição de imagem e (ii) digitalização, processamento de imagem e digitalização. O fluxograma a seguir mostra estes dois estágios (figura 37).

Figura 37 - Fluxograma de processamento de imagem digital de imagem radiográfica em dois estágios: Aquisição de imagens digital e processamento de imagem digital



Fonte: O Autor, 2020.

a) Aquisição de imagem de radiografia digital

Uma exposição de raios-X é feita usando um tubo de raio-X convencional. A radiação que passa atinge o IP. O IP é revestido com fósforos foto-estimuláveis, tipicamente cristais de fluoro-halogeneto de bário dopados com európio. A energia dos raios-X é transferida para os elétrons, movendo-os para níveis mais altos de energia chamados armadilhas de elétrons. Esses elétrons presos podem retornar ao seu nível de energia original sem receber um aumento adicional de energia. Os IPs de hoje podem armazenar uma imagem latente por várias horas e ainda resultar em uma imagem aceitável quando processados. A imagem latente no IP decai espontaneamente, no entanto, com a perda mais rápida ocorrendo durante a primeira hora após a exposição. É sempre prudente processar o IP assim que possível após a exposição para obter a melhor qualidade de imagem possível. O leitor de imagens é a primeira parte computadorizada do processo. O IP é digitalizado com um raio laser de hélio-neon que faz com que os elétrons presos no halogênio retornem ao europiú, liberando a energia armazenada como luz visível.

A luz emitida é coletada através de um guia de luz e coletada por um tubo fotomultiplicador (PMT). Aqui, a energia luminosa é amplificada e convertida em um sinal elétrico, cuja força é proporcional à quantidade de luz liberada. Esses sinais elétricos são convertidos em dados digitais por um conversor analógico-digital. Cada segmento de dados coletados é então enviado para um pixel especificado na matriz da imagem. Cada pixel tem um brilho correspondente ao grau de atenuação da estrutura da imagem (ROBERTS e GRAHAM, 2001).

b) Processamento de imagem e Exibição

O computador avalia e manipula os dados digitais antes da exibição da imagem. Inicialmente, um histograma de imagem é criado, identificando um valor para cada pixel. Esses dados de imagem são comparados com o histograma ideal para o algoritmo de processamento específico que está sendo aplicado aos dados. O conjunto total de dados de imagem é avaliado por meio dessa comparação quanto à superexposição ou subexposição do IP para raios-X. Se uma superexposição ou subexposição do IP for detectada, a saída PMT é ajustada para compensar esse erro e ajuda a criar uma imagem de diagnóstico. Aumentar ou diminuir muito a saída PMT pode resultar na perda da qualidade da imagem; como resultado, é importante que o indivíduo interprete essas imagens digitais para avaliar o indicador incorporado na imagem final para determinar a quantidade de compensação aplicada. Depois que a densidade da imagem é ajustada para ajudar a corrigir a superexposição ou subexposição, o algoritmo de processamento específico selecionado pelo operador para a parte do corpo ou processo de doença específico é aplicado aos dados na matriz da imagem. Esse algoritmo de processamento específico para o exame controla vários parâmetros importantes, incluindo o tipo de reconhecimento eletrônico de dados e a resolução de contraste, incluindo densidade óptica, contraste e tipo de contraste (linear ou não linear). O processamento específico do exame também controla a resolução da frequência espacial, ou seja, a frequência na qual os dados são amostrados e o grau de aprimoramento da borda. É importante aplicar o algoritmo de processamento específico correto ao conjunto de dados, ou a imagem final não pode ser exibida corretamente e pode ser não diagnóstica. Felizmente, a maioria dos leitores IP de CR novos armazena os dados brutos extraídos da IP, e um novo algoritmo de processamento específico pode ser aplicado ao conjunto de dados brutos para obter uma imagem de diagnóstica,

mesmo que o algoritmo de processamento específico errado tenha sido selecionado inicialmente (ROBERTS e GRAHAM, 2001). As imagens CR agora podem ser exibidas e armazenadas como qualquer outra imagem digital. Geralmente, eles são exibidos em um tubo de raios catódicos de alta resolução (CRn como "imagens de cópia eletrônica" ou impressos em filme com uma impressora a laser ou térmica como "imagens de cópia impressa". Alguns sistemas permitem a impressão em formato duplo, que pode colocar automaticamente a mesma imagem processada por dois algoritmos diferentes na mesma folha de filme. Para fins de arquivamento, as imagens podem ser armazenadas em mídia magnética ou óptica, ou cópias impressas podem ser armazenadas como radiografias convencionais em envelopes de papel. Os monitores CRT de alta resolução são capazes de exibir um mínimo de 1000 linhas ou, de preferência, 2000 linhas de dados. A visualização de imagens em formato de cópia eletrônica permite que o revisor aplique inúmeras técnicas de pós-processamento aos dados para ajudar na interpretação. As técnicas mais comuns de pós-processamento incluem aprimoramento de borda, ampliação, ajuste da faixa de contraste exibida e ajuste da dinâmica faixa (nível de escala de cinza) (ROBERTS e GRAHAM, 2001).

O processamento de imagens digitais foi realizado com o software dedicado para processamento de radiografia industrial digital "Isee!", qual foi desenvolvido pelo BAM – "Federal Institute for Materials and Testing", Berlin, Alemanha, que, além de ser um visualizador de imagens radiográficas, com objetivo principal de processamento e análise dimensional após a calibração do tamanho do píxel. Este software foi desenvolvido para atender a requisitos específicos do pessoal de END, ou seja, oferece instrumentos especiais para solucionar tarefas específicas de inspeção: inspeção de costuras de soldagem após a ISO 17636-2, teste de trocadores de calor, inspeção de corrosão e erosão (medição da espessura da parede), etc (VISION IN X INDUSTRIAL IMAGING). Com o software "ISee!" pode-se percorrer todo o ciclo de vida de uma imagem radiográfica digital usando apenas um software: aquisição, visualização e aprimoramento de imagens, gerenciamento (ou seja, fornecimento de meta-informações para arquivamento e uso futuro), medição e análise, compartilhamento (por exemplo, remotas avaliação através de pessoal qualificado) e geração de relatórios de inspeção (VISION IN X INDUSTRIAL IMAGING). São utilizadas funções de visualização disponíveis que incluem: zoom, rolagem/movimento panorâmico, ajustes de contraste (ajustes de pontos em preto e

branco, ajuste de gama), transformações de valor de cinza por meio de tabelas de pesquisa externas. As imagens reduzidas são representadas usando a média em tempo real. Isso evita efeitos de artefatos e moiré durante a visualização de imagens em escalas reduzidas e melhora a taxa de sinal/ruído na tela. A janela avançada do histograma (combinada com os controles de ajuste de contraste) permite ver o que realmente é armazenado no arquivo de imagem. As medições da espessura da parede (com base na lei de absorção de Beer na direção da penetração) permite calcular diferenças de espessura da parede se o coeficiente de atenuação linear efetivo for conhecido ou, vice-versa, o cálculo do coeficiente de atenuação se a diferença da espessura da parede for conhecida (ALEKSEYCHUK e ZSCHERPEL, 2020).

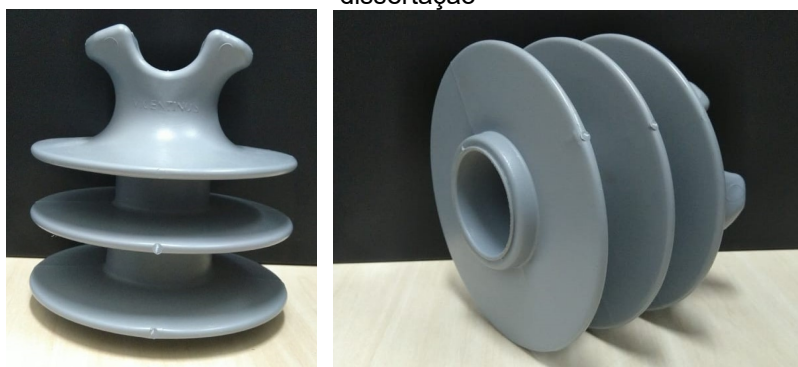
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentado e descrito sobre o isolador polimérico de 15 kV tipo pino utilizado no presente estudo, assim como software de simulação numérica de radiografia digital comercial CIVA-RT versão 11, sistema de radiografia computadorizado utilizado para validação de parâmetros radiográficos obtidos na simulação numérica e software de processamento de imagem digital dedicado para processamento de radiografia digital Isee!.

3.1 ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 15 KV TIPO PINO

Os isoladores poliméricos de 15 kV tipo pino fabricados de polietileno de alta densidade (HDPE) com pigmento de cor cinza e totalmente opaco pelo processo de injeção, o qual foi doado por uma concessionária local, foi utilizado no estudo da presente dissertação. A figura 38 mostra as fotos do isolador polimérico de classe de 15 kV utilizado no presente trabalho. Possuem três saias para melhorar a propriedade dielétrica do isolador polimérico aumentando a distância de escoamento.

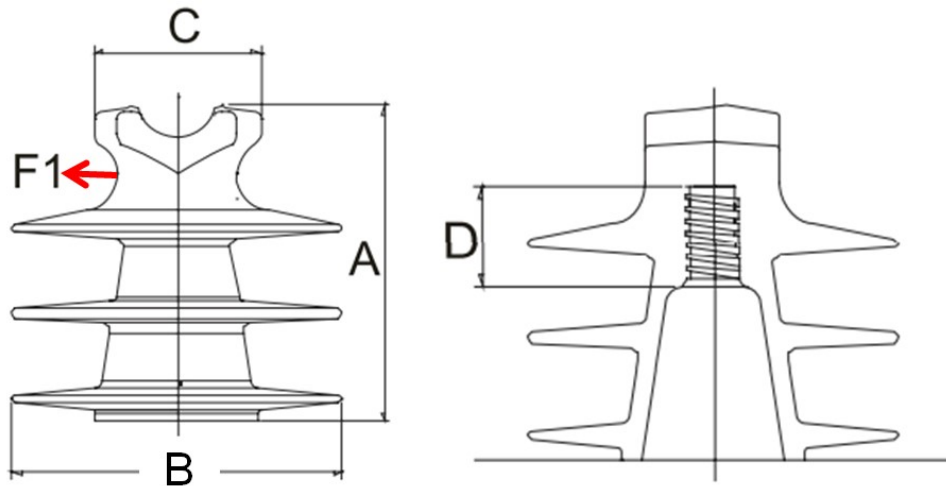
Figura 38 - Fotos do isolador polimérico tipo pino classe 15 kV utilizado para o estudo na presente dissertação



Fonte: O Autor, 2020.

Com respeito à morfologia e dimensão do isolador polimérico de 15 kV, assim como projeto de construção dos isoladores poliméricos tipo pino, os esquemas são mostrados na figura 39. Os valores das dimensões assim como as propriedades físicas e mecânicas do isolador polimérico utilizado no presente estudo estão apresentados na tabela 2.

Figura 39 - Esquemas de um isolador polimérico classe 15 kV tipo pino utilizado no presente estudo



Fonte: VICENTINOS, 2020.

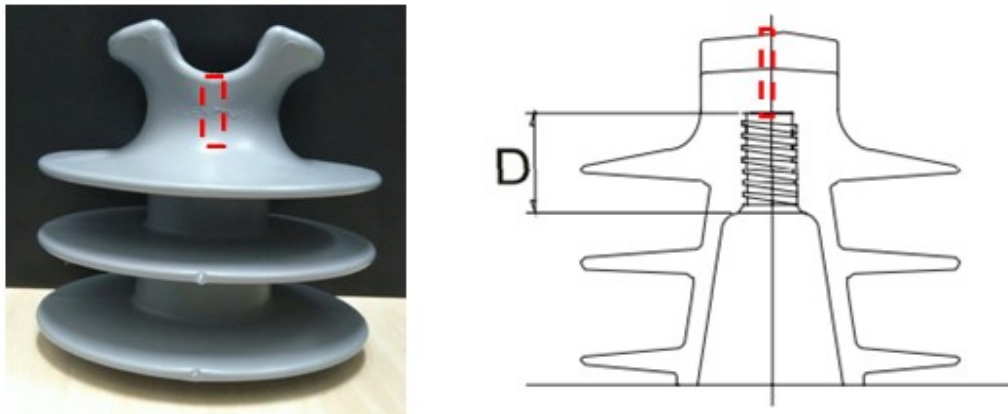
Tabela 2 - Dimensão e característica física e mecânica do isolador polimérico de 15 kV utilizado na presente dissertação

Classe de Tensão	Dimensões [mm]				Distância de Escoamento [mm]	F1 - Força de Flexão [N]	Rosca (ϕ) [mm]
15 kV	A	B	C	D	345	15000	25
	125	140	85	45			

Fonte: VICENTINOS, 2020.

Ademais, visando simular um defeito interno, tipo vazio (void) no interior do isolador polimérico tipo pino de 15 kV, um furo passante de diâmetro conhecido foi realizado com uma broca de 4 mm. A foto da figura 40 mostra o local em que o furo passante foi realizado no isolador polimérico.

Figura 40 - Indicação do local em que foi realizado um furo passante com broca de 4 mm no Isolador polimérico de 15 kV simulando um defeito de fabricação de vazio milimétrica



Fonte: O Autor, 2020.

3.2 SIMULADOR DEDICADO PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE IMAGEM RADIOGRÁFICA VIRTUAL DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 15 KV

Para realizar simulação numérica da imagem radiográfica do isolador polimérico de 15 kV tipo pino, primeiramente, o desenho CAD do isolador polimérico foi feito com software SolidWorks. O software de simulação numérica dedicado para simulação numérica de radiografia industrial é um software comercial CIVA-RT versão 11.0. A dimensão do Imaging Plate foi considerada 430 mm de comprimento e 125 mm de largura de alta resolução. Os parâmetros utilizados para simulação numérica foram:

- Fonte de raios-X com ponto focal de 0,5 mm X 0,8 mm e potência de 1,2 kW (120 kV e 1 mA),
- Distância entre a fonte de radiação e isolador polimérico/IP: 0,30 m a 10,0 m
- Tempo de exposição: 40 s a 60 s.
- Isolador polimérico de HDPE utilizando os parâmetro físico e químico apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 3 - Propriedades física, química, mecânica, elétrica do isolador polimérico de 15 kV tipo pino

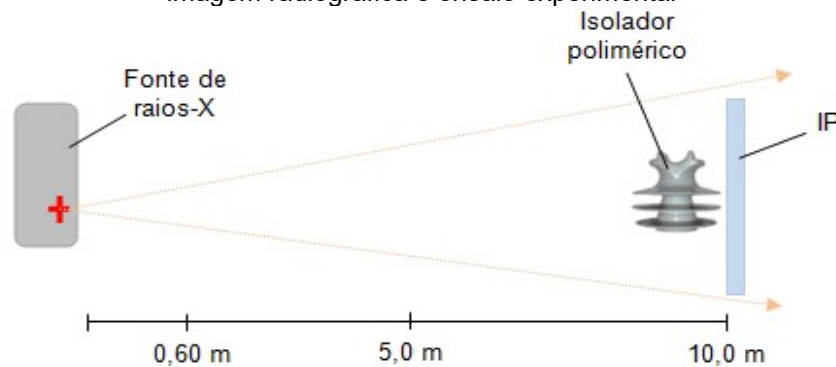
Polietileno de alta densidade (HDPE)	
Densidade	940 kg/m ³
Ponto de Fusão	130.8 °C
Temperatura de cristalização	111.9 °C
Calor de fusão latente	178.6 kJ/kg
Condutividade térmica	0.44 W/m.°C. at°C
Calor específico (sólido)	1.9 kJ/kg. °C
Cristalinidade	60%
Massa específica	0,7 a 3 g/cm ²
Módulo de elasticidade	0,002 a 7 GPa
Limite de resistência à tração	10 a 100 MPa
Resistência à fratura	0,4 a 5 MPa $\sqrt{m}$
Condutividade elétrica	10 ⁻¹⁸ a 10 ⁻⁹
Potência de tensão de flashover quando seca	75 kV

Impulso crítico da tensão do flashover	110 kV
Frequência da tensão de punção em baixa potência	162 kV

Fonte: COOLEY, 2018; GODOI et.al., 2009; MELLO, 2018.

O arranjo utilizado para simulação numérica de imagem radiográfica por simulador é mostrado na figura 41.

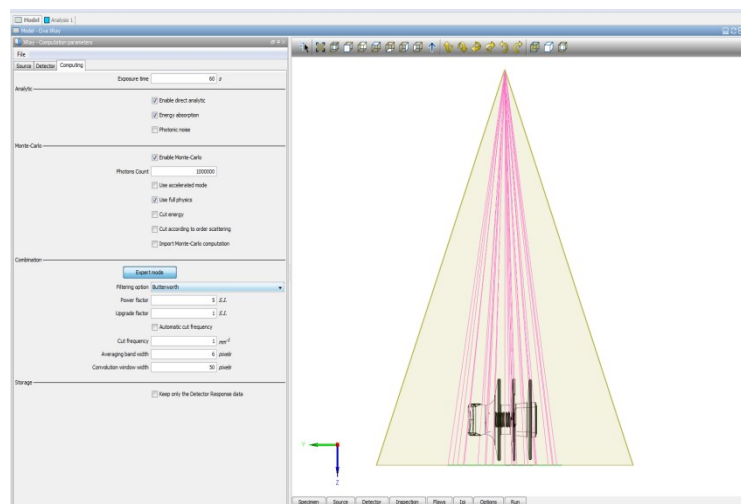
Figura 41 - Esquema de método de absorção adotado para ensaios de simulação numérica de imagem radiográfica e ensaio experimental



Fonte: O Autor, 2020.

Para conduzir os testes de simulação numérica da imagem radiográfica de um sistema de radiografia computadorizada foi utilizado o computador de fabricante Hewlett-Packard Company, modelo HP Z200 Workstation com processador Intel® Xeon® CPU X3450 @ 2.67GHz 2.8 GHz e memória RAM de 8,00 GB com sistema operacional Windows 7 Professional de 64 Bits.

Figura 42 - Página para inserir Simulação numérica



Fonte: O Autor, 2020.

3.3 SISTEMA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADO PARA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS RADIOGRÁFICOS

Visando validar experimentalmente os parâmetros radiográficos obtidos em simulação numérica de imagens radiográficas, inspeção de isoladores poliméricos foram realizados com o sistema radiográfico composto de:

- Fonte de raios-X portátil movida à bateria de dimensão focal de 0,5 mm X 0,8 mm e potência máxima de 1200 W (120 kV e 1 mA), modelo CP120B, da ICM, Bélgica.
- Detector de imagem radiográfica Imaging Plate (IP) de alta resolução, tipo azul de 12 cm X 43 cm, Perkin-Elmer, Estados Unidos.
- Leitor de IP a laser de alta resolução espacial de 40 μm e 16 bits, modelo HD-CR 35 NDT, da Dürr, Alemanha, com uso de feixe de laser de 20 μm .
- Computador Workstation Laptop DELL Precision M6700.

Figura 43 - Sistema de radiografia computadorizada empregado na validação do parâmetro radiográfico

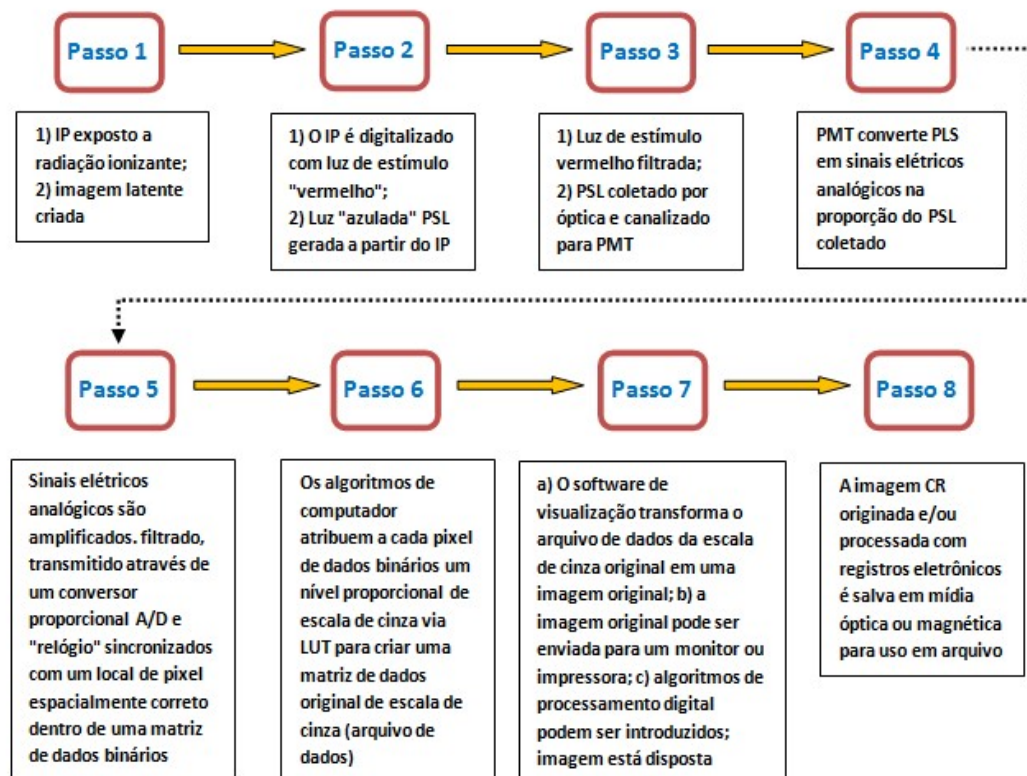


Fonte: O Autor, 2020.

3.3.1 Processamento de Imagem Digital

O processamento de imagem digital foi realizado com o software que foi desenvolvido pelo BAM para processamento de radiografia industrial denominado de Isee! que além de ser um visualizador de imagens radiográficas industrial, possui filtros matemáticos para processamento de radiografia digital. A janela avançada do histograma, combinada com os controles de ajuste de contraste, permite e auxilia visualizar com melhor contraste. As medições da espessura da parede do isolador polimérico são possíveis a partir de calibração do píxel, pois, de acordo com a lei de absorção de Beer-Lambert, permite calcular diferenças de espessura resultando em contraste devido ao coeficiente de atenuação linear efetivo. O procedimento básico de obtenção de imagem radiográfica computadorizada é mostrada na figura 44.

Figura 44 - Processo básico da radiografia computadorizada



Fonte: ASTM E2007-10.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

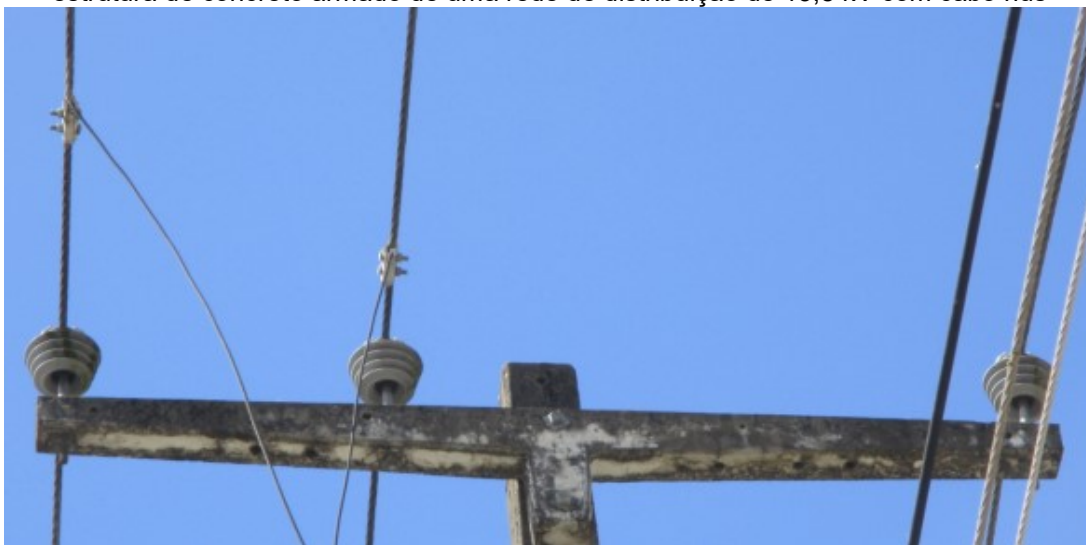
Na presente secção são apresentados resultados de imagens radiográficas dos isoladores poliméricos de 15 kV tipo pino obtidas por simulação numérica, assim como experimentalmente no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE visando validar os parâmetros radiográficos obtidos através da simulação numérica. entretanto, validação experimental das imagens radiográficas ficaram limitadas até uma distância de 1 m entre a fonte de raios-X e o detetor de alta sensibilidade Imaging Plate (IP). Através de simulação numérica, obteve-se imagens radiográficas até 10 m de distância entre a fonte de raios-X e o detetor IP, entretanto, em função do acesso limitado ao laboratório de radiografia durante o período da pandemia do covid-19, ensaio experimental ficado limitado a obter imagens radiográficas dos isoladores poliméricos de classe 15 kV até uma distância de 1 m e testes em campo também não foram possíveis de serem conduzidos.

Apesar dos ensaios radiográficos em campo não terem sido realizados, é apresentado brevemente também sobre os isoladores poliméricos instalados em rede de distribuição de 13,8 kV em Pernambuco, pois, muitos dos isoladores poliméricos foram instalados sem a prévia inspeção sobre a existência ou não da presença de falhas de fabricação tipo vazios por imagem radiográfica, pois, estima-se que possivelmente uma fração dos isoladores poliméricos instalados na rede de distribuição devem conter vazios e em locais considerados críticos.

4.1 DANOS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE DE 15 KV NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO TIPO PINO INSTALADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO EM PERNAMBUCO

Ainda encontram-se nas redes de distribuição de energia elétrica isoladores tradicionais de vidro, porcelana, mas o domínio atual é de uso de isoladores poliméricos. A figura 45 mostra uma estrutura de concreto com três isoladores poliméricos de 15 kV instalados nos pinos metálicos e em operação.

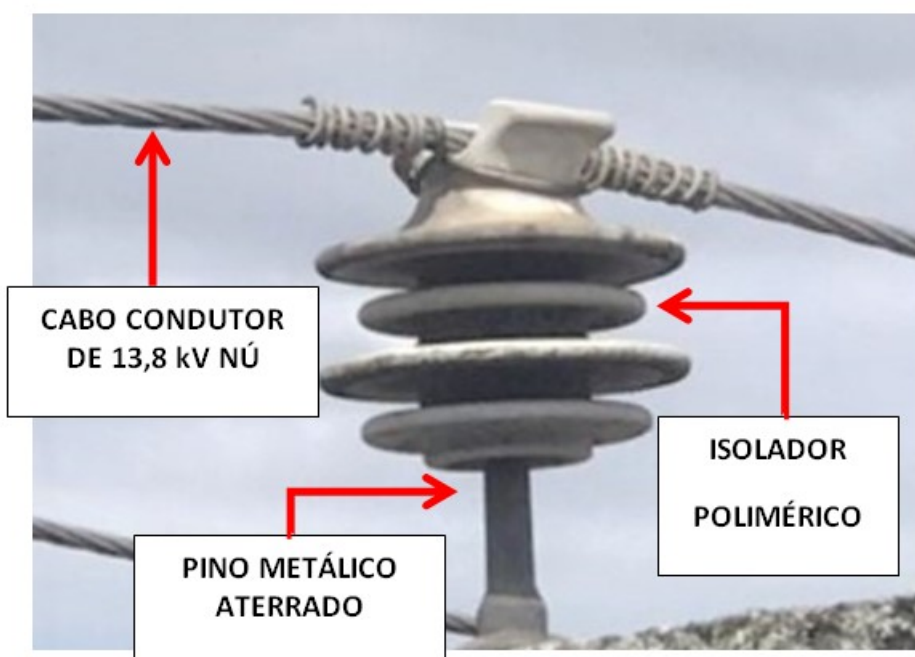
Figura 45 - Foto de isoladores poliméricos tipo pino de classe 15 kV instalados e em operação numa estrutura de concreto armado de uma rede de distribuição de 13,8 kV com cabo nus



Fonte: O Autor, 2020.

Numa outra estrutura, na figura 46, nota-se que o isolador polimérico de 15 kV já apresenta degradação superficial devido ação do intemperismo. Ademais, o cabo condutor está diretamente assentado na parte superior do isolador polimérico sem uso de um material plástico como mostrado na figura 46.

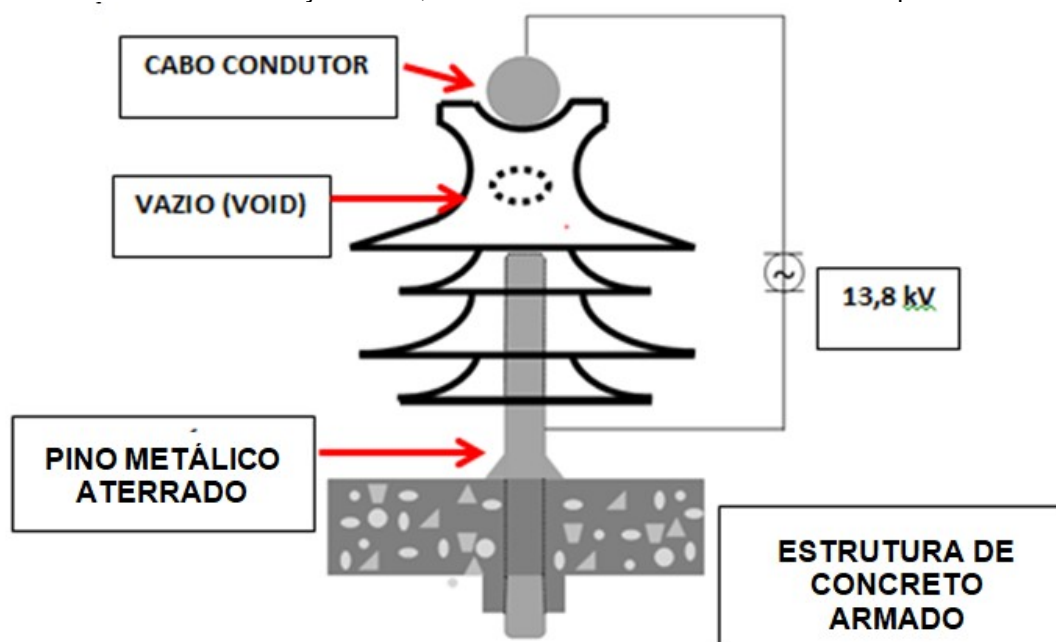
Figura 46 - Foto em detalhe mostrando um isolador polimérico de pino de classe 15 kV na estrutura de concreto armado fixado no pino metálico de uma rede de distribuição de 13,8 kV com cabo condutor nú e com um grau de degradação



Fonte: O Autor, 2020.

Como mostrado nas figuras 45 e 46, os cabos condutores de 13,8 kV estão todos nus, portanto, caso o isolador polimérico apresentar vazios (void), é uma condição de operação considerada crítica para os isoladores poliméricos, podendo ocorrer a disrupção iniciando a partir de descarga parcial. Por outro lado, caso possua vazios no seu interior entre o assento do cabo condutor e no fim de curso do pino metálico, torna-se uma condição mais crítica, pois, entra o terceiro efeito que o efeito *fretting* que é causado pelo desgaste do material do isolador polimérico devido movimento relativo ao longo do dia, ao longo do período de operação. Visando compreender melhor as condições operacionais dos isoladores das figuras 45 e 46, caso possua vazio no isolador polimérico entre o cabo condutor e o pino metálico na presença de estresse elétrico de 13,8 kV devido a ocorrência de PD – descarga parcial, um esquema foi preparado e está mostrado na figura 47.

Figura 47 - Esquema de um isolador polimérico pino de classe 15 kV na estrutura de concreto armado de uma rede de distribuição de 13,8 kV com cabo condutor nú fixado num pino metálico



Fonte: O Autor, 2020.

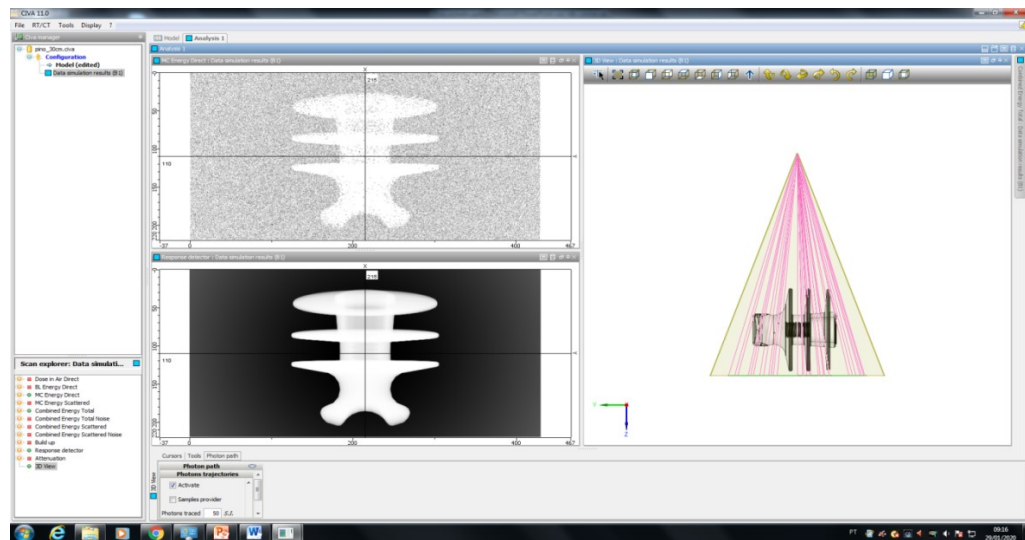
O cabo condutor nu assentado sobre o isolador polimérico, o qual está fixado num pino metálico aterrado como mostrada na figura 47 é a condição considerada a mais crítica. Assim, os isoladores poliméricos devem ser monitorados, por exemplo, pela técnica de radiografia digital sem a necessidade de desligamento e caso detecte vazios, programar a substituição. Caso os referidos isoladores poliméricos,

que são fabricados pelo processo de injeção, de acordo com estudos realizados vários autores, caso possua vazios de dimensões milimétricas (BARBOSA E MACEDO, 2004; MENDONÇA E SHINOHARA, 2010; GODOI et al., 2016), sob estresse elétrico ou ocorrência de sobretensão poderá ocorrer descargas parciais no vazio interno causando a disrupção interna e desligando em definitivo a rede de distribuição. Pelo fato das técnicas atuais de monitoramento não permitirem a detecção de presença de vazios no interior dos isoladores poliméricos de 15 kV instalados na rede de distribuição, uma nova técnica que permita detectar vazios seria interessante para as concessionárias. Em função de trabalhos de pesquisa realizados principalmente na UFPE, o Comitê CIGRÉ-Brasil já recomenda inspeção de isoladores poliméricos após a fabricação, mas ainda não existe um procedimento de inspeção por raios-X nos isoladores poliméricos de 15 kV instalados na estrutura de concreto armado.

4.2 IMAGENS RADIOGRÁFICAS OBTIDAS POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE DE 15 KV

Como resultado, foi constatado que a simulação numérica de radiografia virtual dos isoladores poliméricos de 15 kV com o Software comercial CIVA-RT permitiu simular o sistema de radiografia computadorizado com sucesso. Inicialmente, telas de simulação numérica são mostradas nas figuras de 48 a 53. Virtualmente, as distâncias entre a fonte de raios-X ao isolador polimérico de 15 kV foram variadas de 0,3 m a 10 m, visando explorar a potencialidade aplicativa da alta sensibilidade do Imaging Plate.

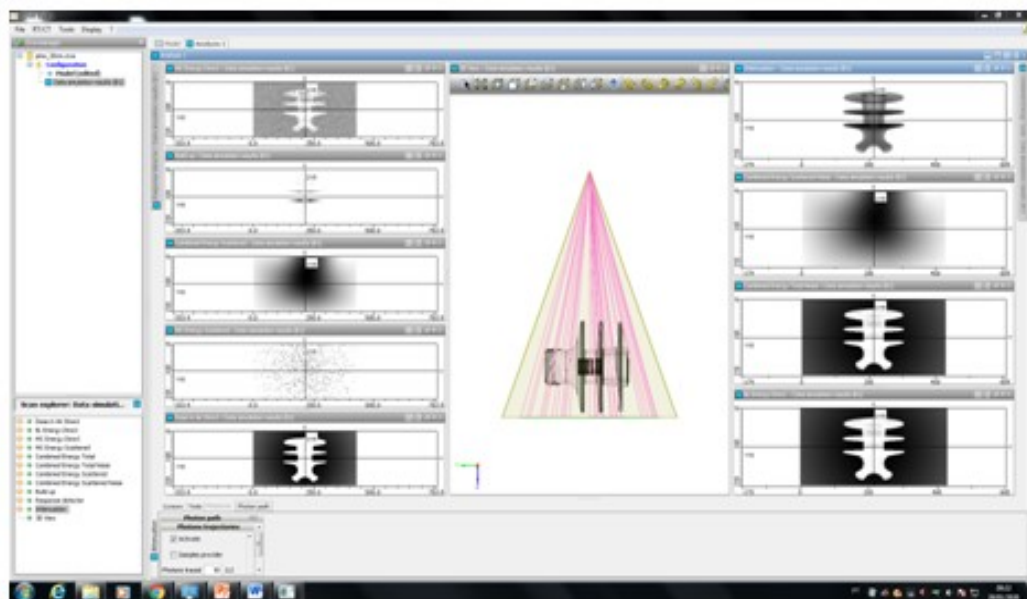
Figura 48 - Simulação numérica com distância entre a fonte de raios-X e IP de 0,60 m



Fonte: O Autor, 2020.

Na figura 49 observam-se dados adicionais em relação à figura 48.

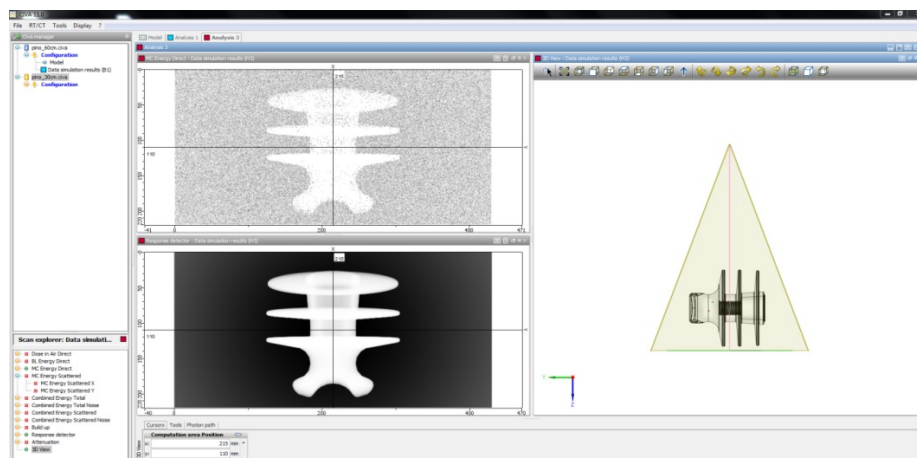
Figura 49 - Isolador polimérico de com a distância de 0,60 m



Fonte: O Autor, 2020.

Na figura 50, utilizando o mesmo tempo de exposição e alterando a distância de 60 cm para uma distância de 5 metros entre a fonte de radiação e isolador polimérico é mostrada.

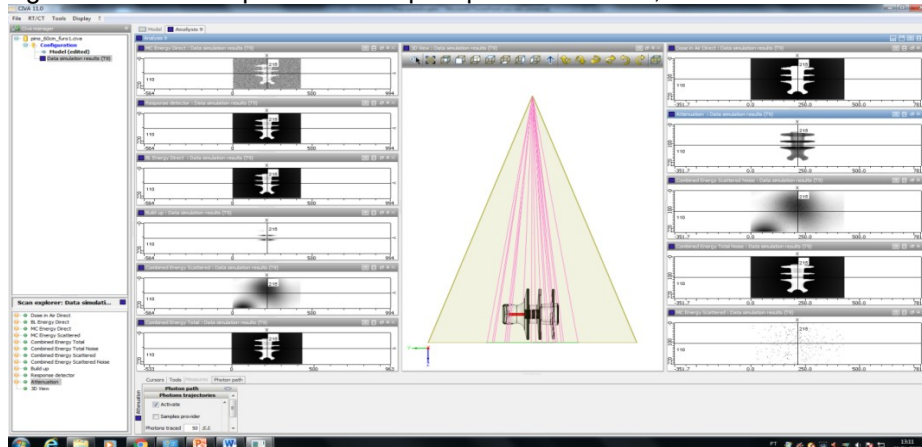
Figura 50 - Simulação numérica com distância entre a fonte de raios-X e IP de 5,0 m



Fonte: O Autor, 2020.

O software CIVA-RT possibilita também o *layout* do isolador polimérico desenhado em CAD em relação ao feixe do raios-X, mostrando assim a interação da radiação com o desenho CAD. Dados adicionais são mostradas na figura 51.

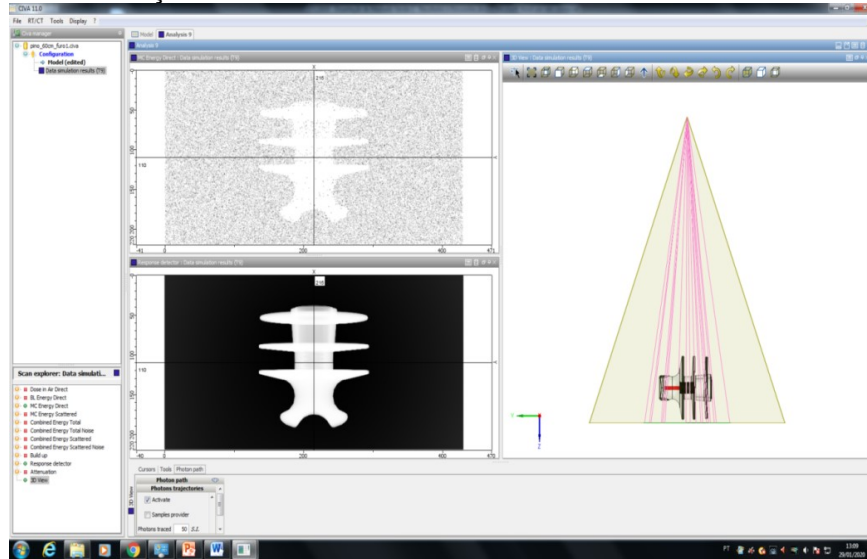
Figura 51 - Isolador polimérico de pino posicionado à 5,0 m da fonte de raios-X



Fonte: O Autor, 2020.

Nas figuras 52 e 53, são mostrados o resultado de simulação de radiografia de isolador polimérico de 15 kV posicionado à 10 m.

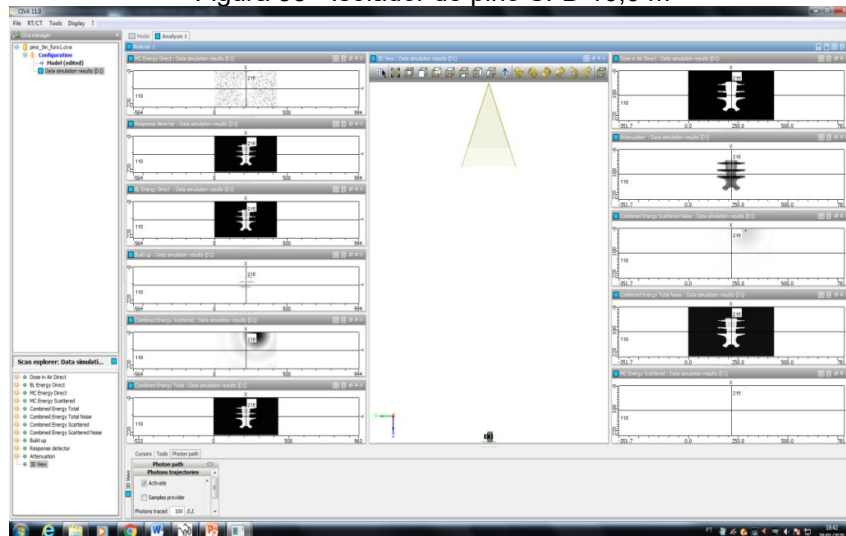
Figura 52 - Simulação numérica com distância entre a fonte de raios-X e IP de 10,0 m



Fonte: O Autor, 2020.

Na figura 53 é mostrada os resultados de simulação com dados adicionais posicionando o isolador polimérico de 15 kV à 10 m da fonte de raios-X.

Figura 53 - Isolador de pino SFD 10,0 m



Fonte: O Autor, 2020.

As figuras 54, 55 e 56 mostram as imagens radiográficas simuladas de isolador polimérico de 15 kV posicionado à 0,6 m, 5m e 10 m. São mostradas as imagens como obtidas e processadas com software Isee!.

Figura 54 - Simulação numérica da imagem radiográfica como obtidas posicionando



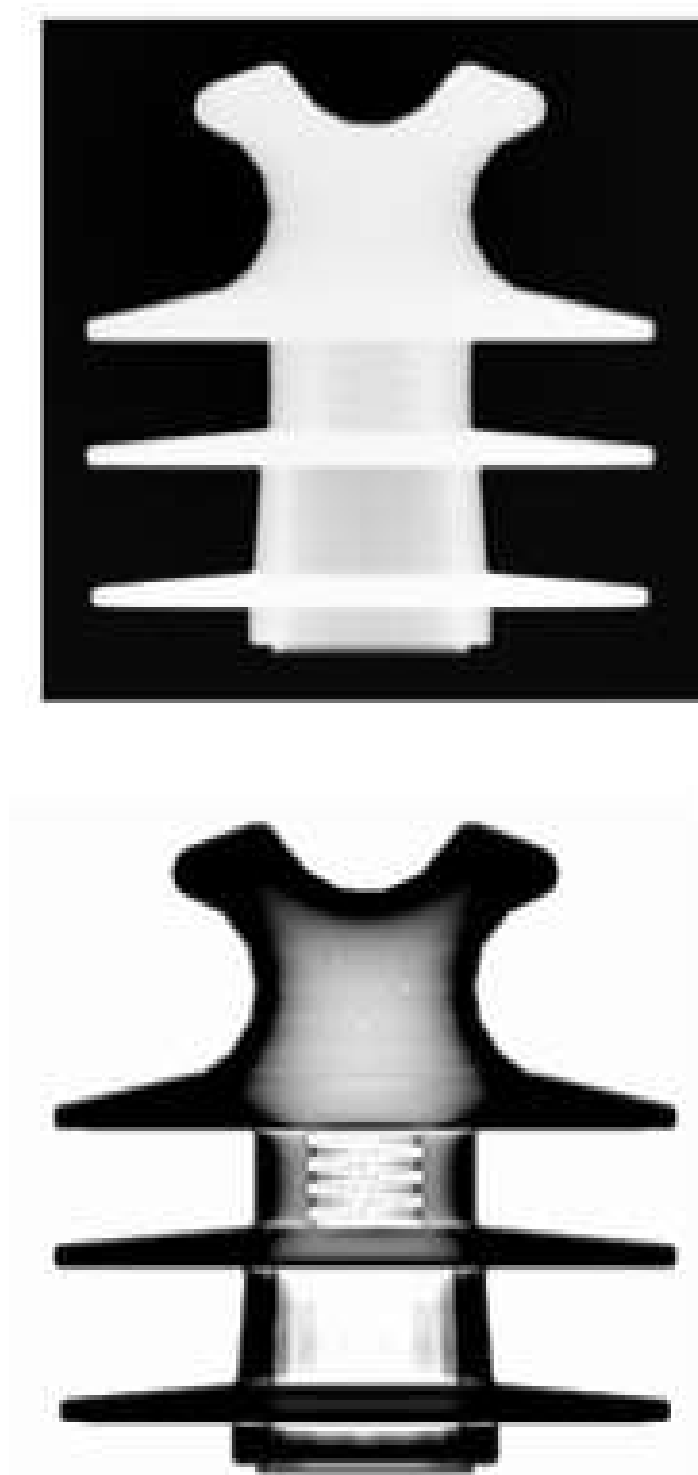
Fonte: O Autor, 2020.

Figura 55 - Simulação numérica das imagens radiográficas como obtidas posicionando o isolador polimérico a 5 m entre a fonte de radiação e o isolador polimérico



Fonte: O Autor, 2020.

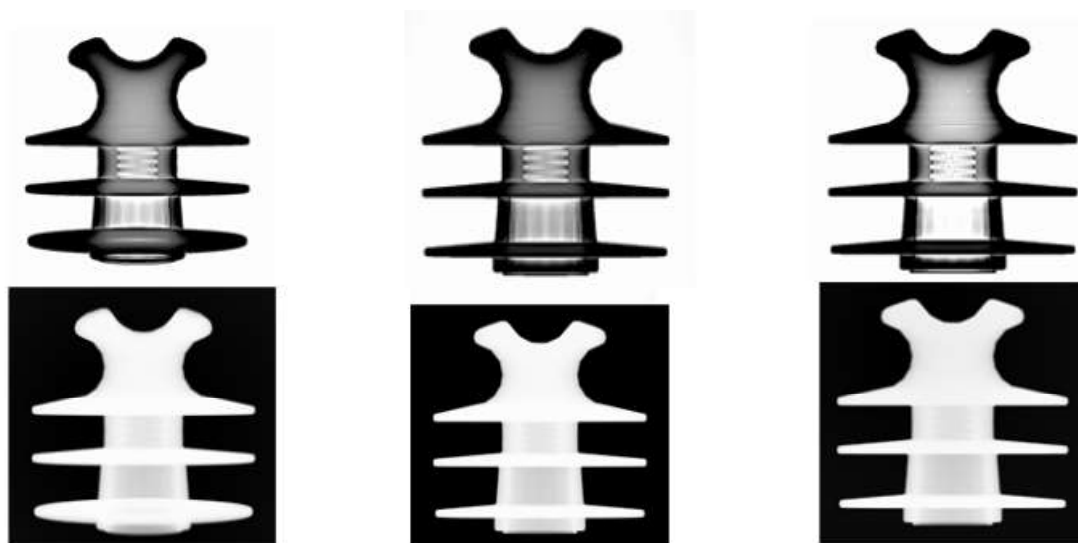
Figura 56 - Simulação numérica das imagens radiográficas como obtidas posicionando o isolador polimérico a 10 m entre a fonte de radiação e o isolador polimérico



Fonte: O Autor, 2020.

Na figura 57 são mostradas as radiografias virtuais obtidas por simulação às três distâncias. Entre as imagens radiográfica obtidas com às distâncias de 5 m e 10 m não nota-se nenhuma diferença. Entretanto, a imagem radiográfica virtual obtida à 0,6 m mostra distorção devido à proximidade à fonte de radiação.

Figura 57 - Simulação numérica das imagens radiográficas como obtidas posicionando o isolador polimérico à 0,6 m, 5 m e 10 m entre a fonte de radiação e o isolador polimérico



Fonte: O Autor, 2020.

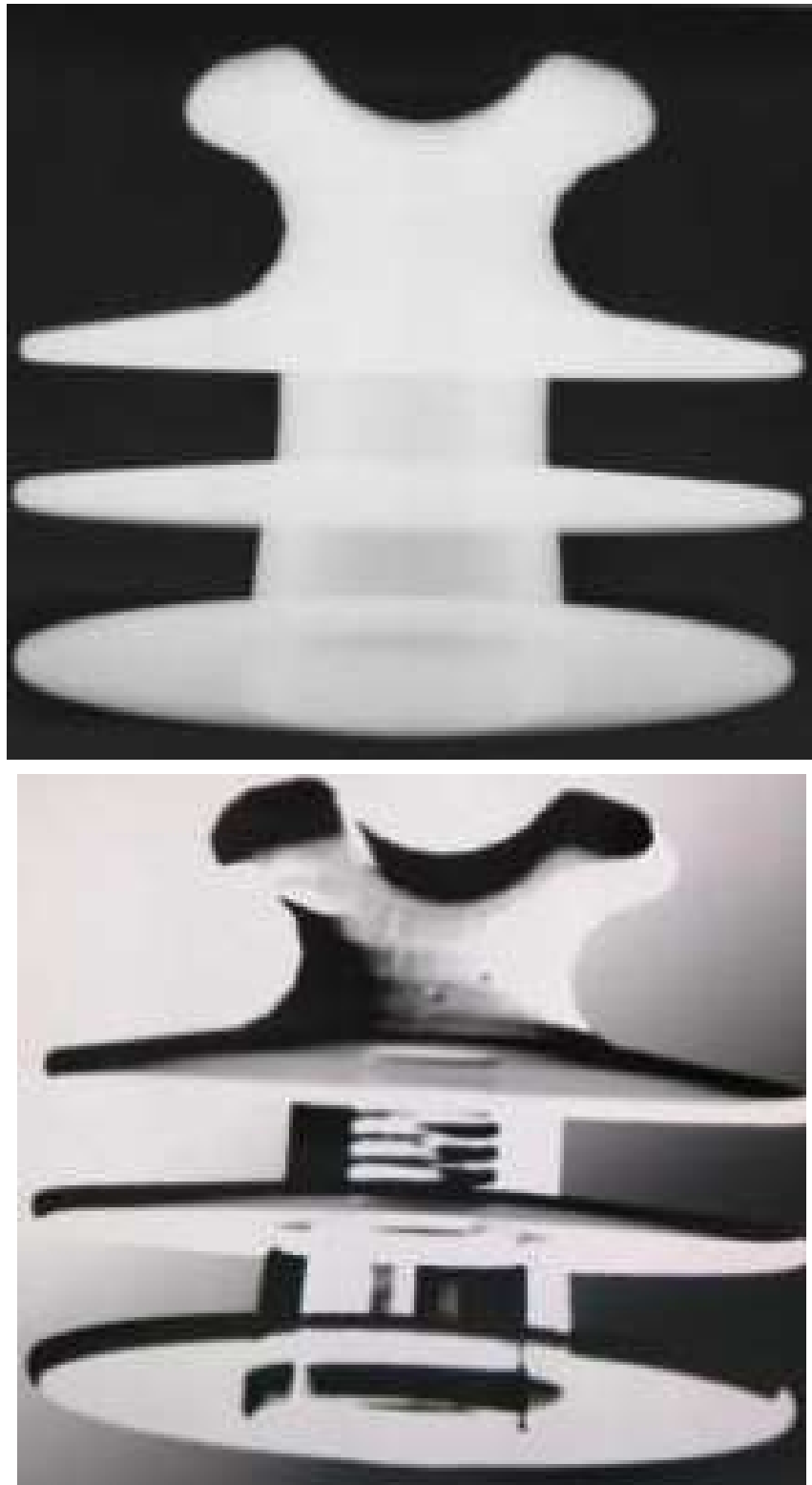
Para a inspeção, foram utilizados parâmetros de distâncias, como são mostradas nas figuras 54 a 57, para se obter parâmetros radiográficos comparando com os resultados obtidos.

Após adquirir as imagens radiográficas através da simulação numérica pode-se concluir que não é possível notar diferenças nas imagens utilizando 10,0 m e 5,0 m mesmo após o processamento de imagem digital com o software Isee!.

Por outro lado, na imagem obtida à 0,6 m, devido á proximidade à fonte de radiação, nota-se uma distorção em relação às imagens radiográficas virtuais obtidas à 5 m e à 10 m.

Na figura 58 são mostradas as imagens de radiografia digital virtual posicionando à 0,3 m da fonte de radiação. A distorção da imagem é mais notória. Após processamento de imagem digital, dois vazios simulados de 1 mm torna-se visível na região entre o assento do cabo e fim do curso do pino.

Figura 58 - Imagem radiográfica como obtida (acima) e processada com filtro “Pseudo Plast” (abaixo) mostrando vazios simulados

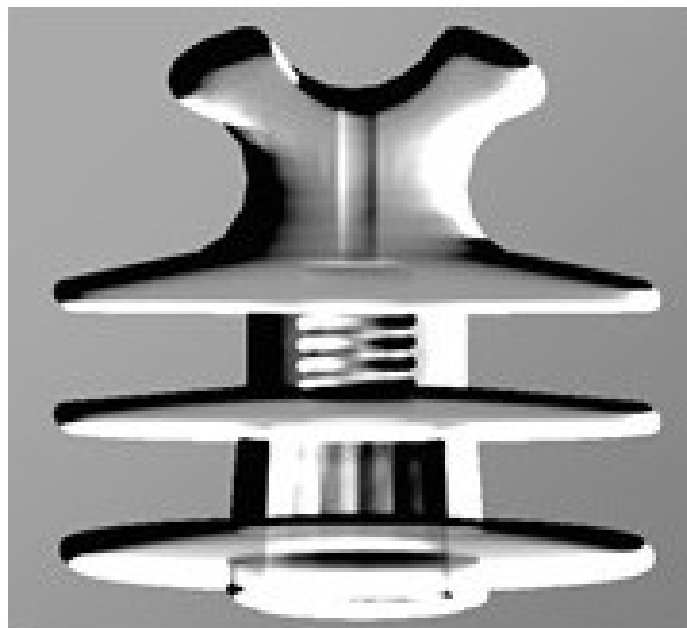


Fonte: O Autor, 2020.

As figura 59, 60 e 61 mostram imagens radiográficas simuladas do isolador polimérico com furo de 4 mm posicionando à 0,6 m.

Figura 59 - Imagem radiográfica simulada do isolador de pino de 15 kV com furo de 4 mm posicionado à 0,6 m como obtida e com processamento de imagem digital com o filtro Pseudo-Plast

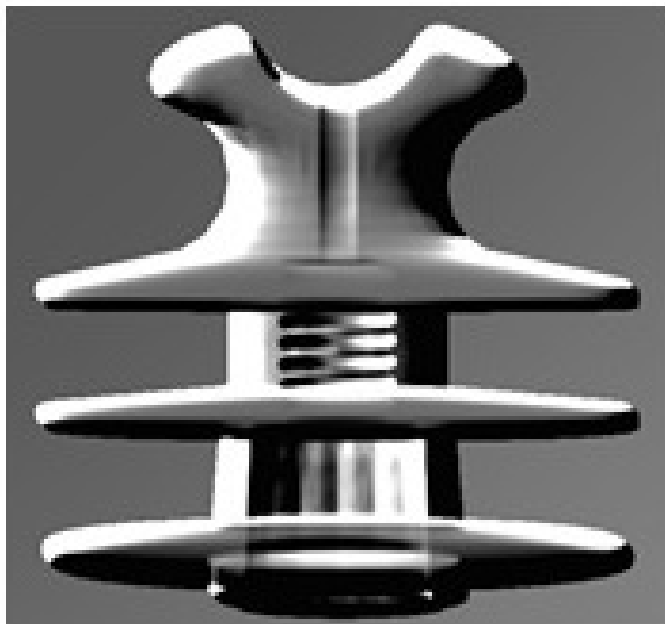
Postiva



Fonte: O Autor, 2020.

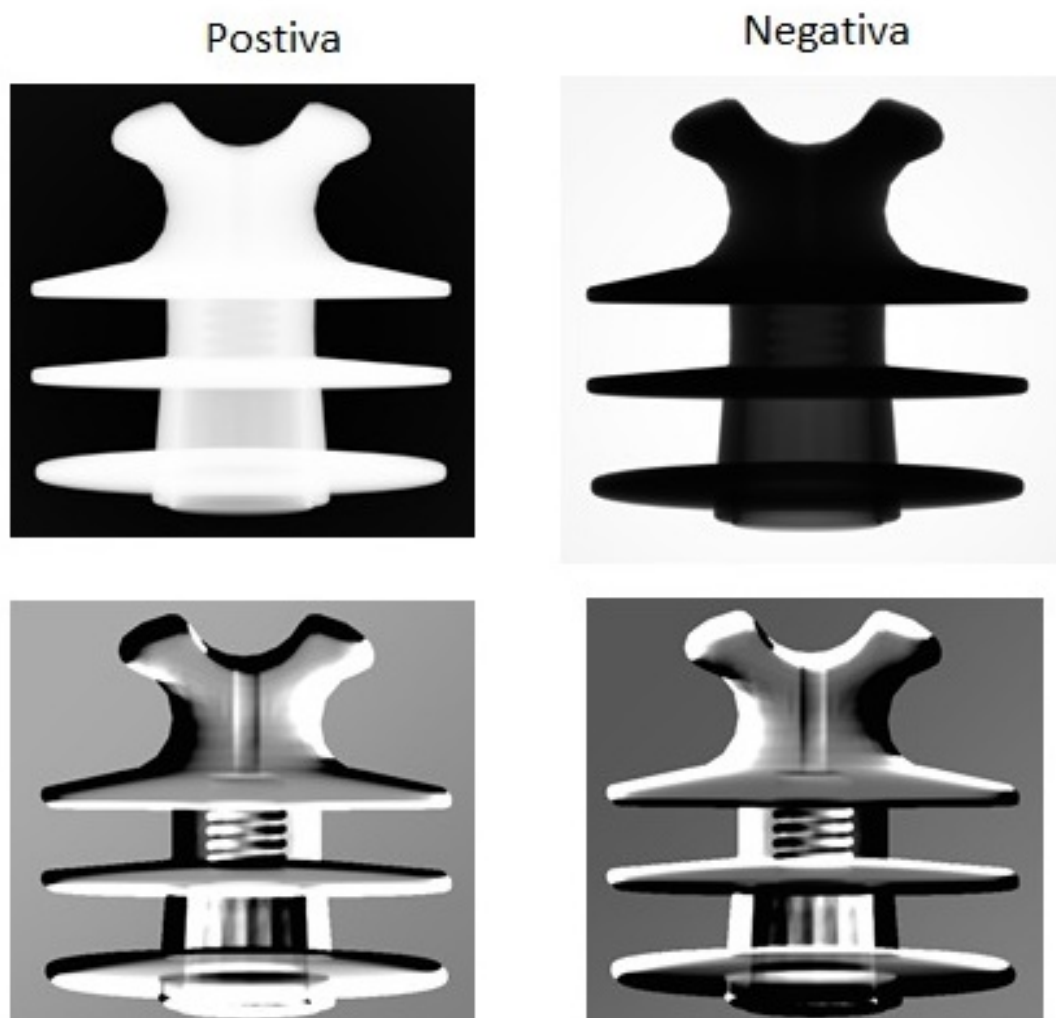
Figura 60 - Imagem radiográfica simulada do isolador de pino de 15 kV com furo de 4 mm posicionado à 0,6 m como obtida e com processamento de imagem digital com o filtro Pseudo-Plast

Negativa



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 61 - Imagem radiográfica simulada positiva e negativa do isolador polimérico de pino de 15 kV com furo de 4 mm posicionado à 0,6 m como obtida e com processamento de imagem digital com o filtro Pseudo-Plast

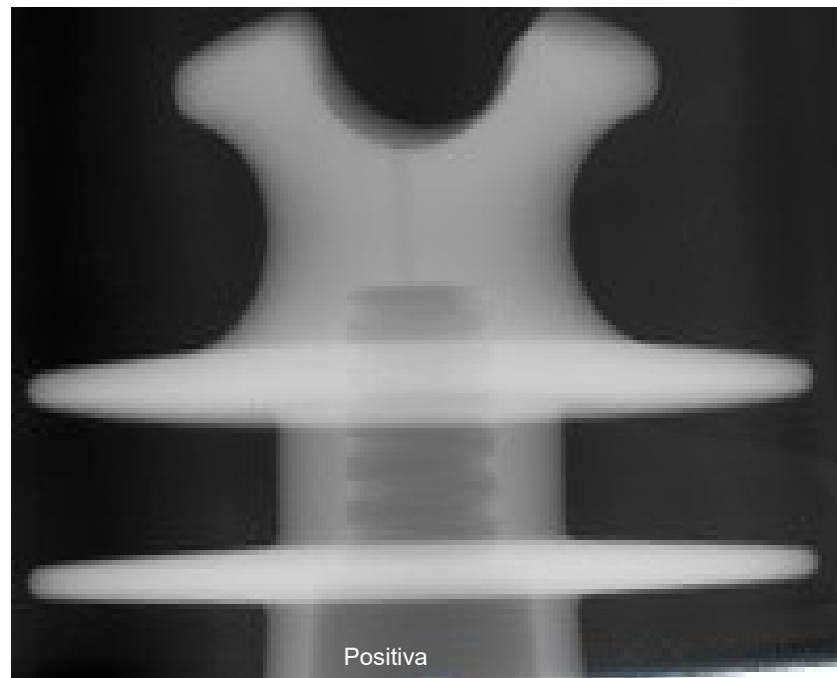


Fonte: O Autor, 2020.

4.3 IMAGENS RADIOGRÁFICAS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS DE CLASSE DE 15 KV OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE COM RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADO

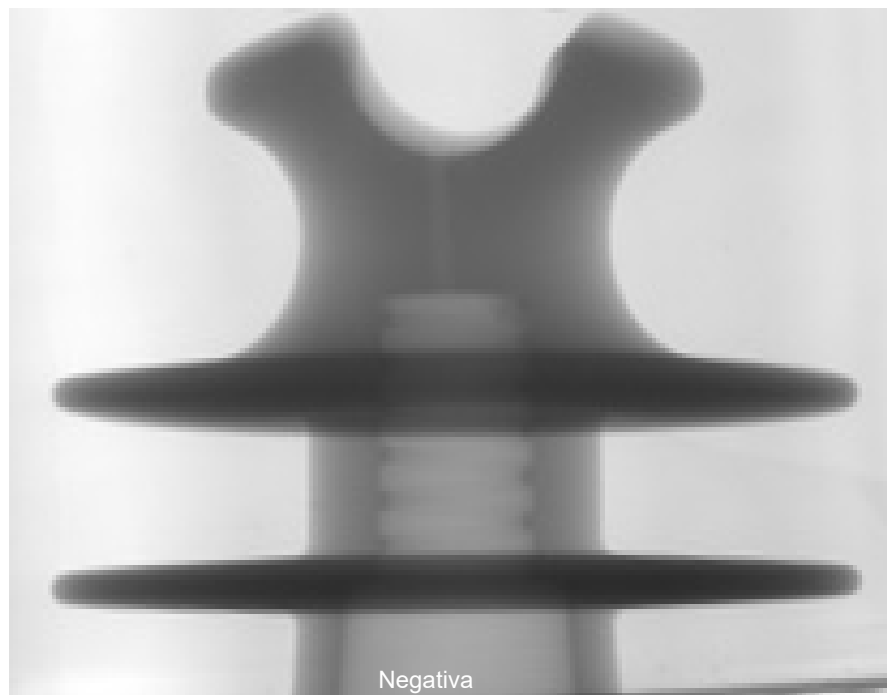
Para a validação experimental foi realizada a radiografia computadorizada em laboratório e as imagens radiográficas como foram obtidas estão mostradas nas figuras 62 e 63.

Figura 62 - Imagem radiográfica experimentalmente como obtida posicionando à 1,0 m



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 63 - Imagem radiográfica experimentalmente como obtida posicionando à 1,0 m

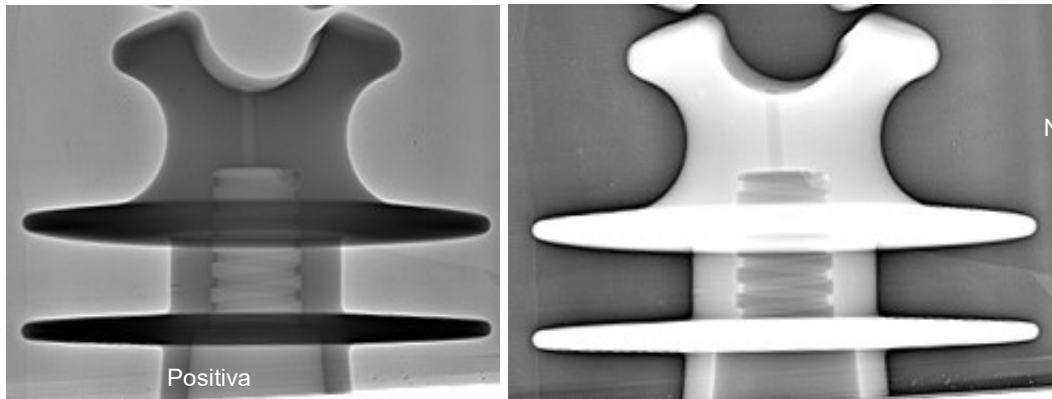


Fonte: O Autor, 2020.

Na figura 64 as imagens das figuras 62 e 63 foram processadas com o software "Isee! do BAM" com o objetivo de realçar os detalhes das imagens como obtidas. É claramente notável a qualidade e o ganho de informações com a

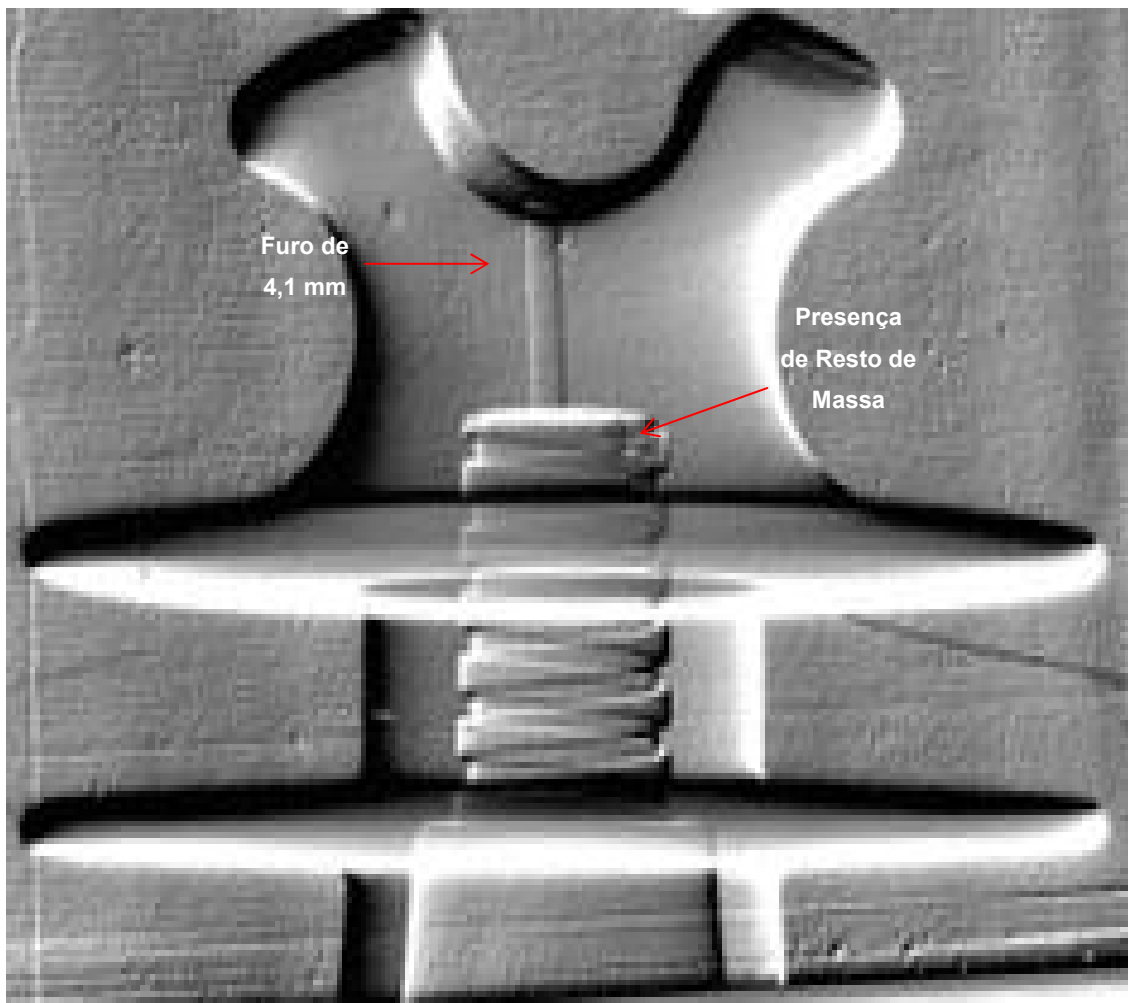
aplicação do filtro “enhance detail” do software Isee!. Na imagem positiva, além do furo de 4 mm, nota-se também a presença de massa no interior do isolador polimérico.

Figura 64 - Imagem processada com filtro “enhance detail” do software ISee!



Fonte: O Autor, 2020.

Figura 65 - Imagem processada com filtro “Pseudo Plast”

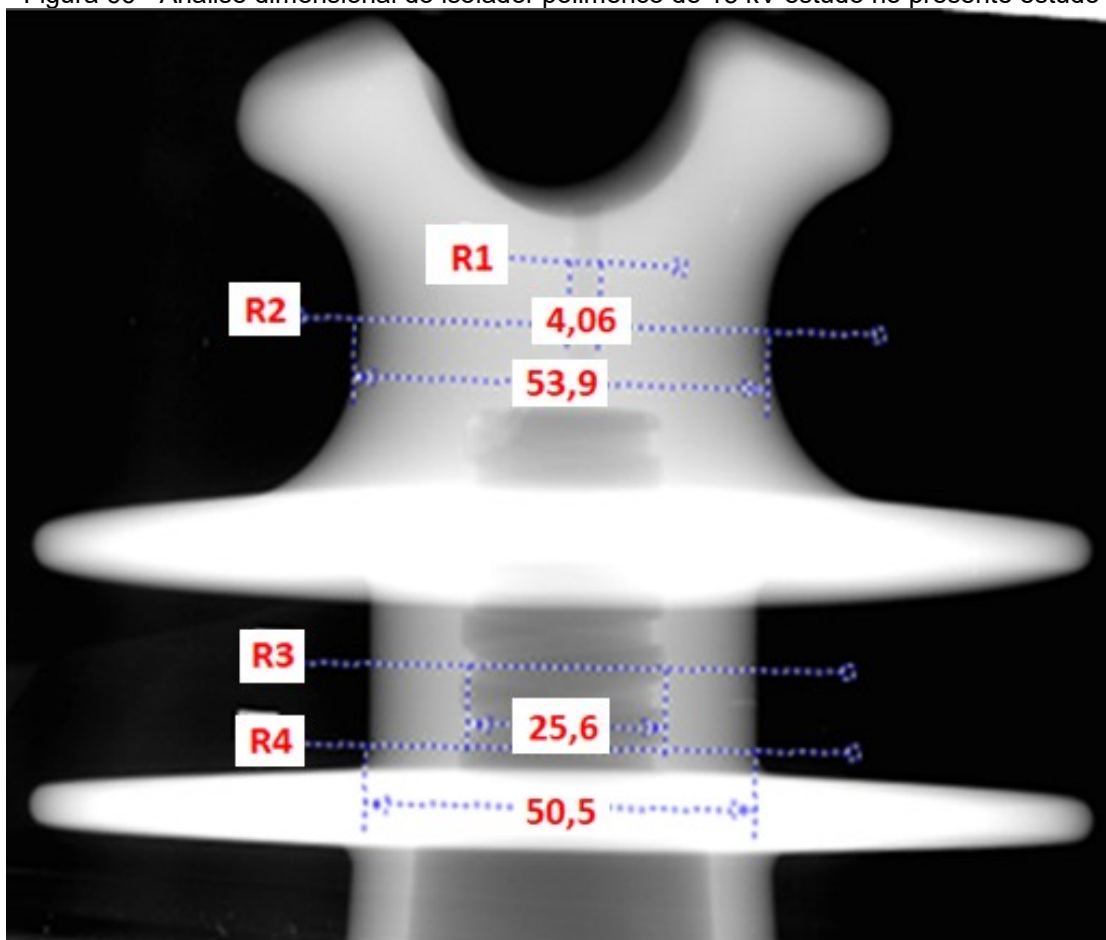


Fonte: O Autor, 2020.

Aplicando o filtro Pseud-Plast do software Isee! para processamento da imagem radiográfica da figura 62, os contornos são realçados e o resultado é mostrado na figura 65, mostrando mais claramente a presença de resquício da massa e o furo de 4 mm.

Na figura 66, após a calibração de pixel, o resultado da análise dimensional do isolador polimérico é mostrado.

Figura 66 - Análise dimensional do isolador polimérico de 15 kV estudo no presente estudo



Fonte: O Autor, 2020.

Após o processamento das imagens radiográficas digitais com software Isee!, as regiões de interesse foram realçadas destacando detalhes além de possibilitar a análise dimensional.

5 CONCLUSÕES

Na presente dissertação, realizou-se um estudo de interpretação das imagens radiográficas obtidas dos isoladores poliméricos de 15 kV tipo pino produzidos pelo processo de injeção através da técnica de radiografia computadorizada, inicialmente através de simulação numérica utilizando um software comercial CIVA-RT, versão 11 pelo método de distância, no qual imagens radiográficas simuladas foram obtidas variando a distância entre a fonte de raios-X ao isolador polimérico em referência de 0,3 m até 10 m. Posteriormente, para validar experimentalmente os parâmetros radiográficos obtidos na simulação numérica, imagens radiográficas com sistema de radiografia computadorizado foram obtidas experimentalmente variando a distância entre a fonte de raios-X ao isolador polimérico de 0,6 m a 1,0 m. A validação experimental dos parâmetros radiográficos ficou limitada à distância máxima de 1 m devido à dificuldade de acesso ao laboratório de radiografia durante o período de pandemia do covid-19, entretanto, as seguintes conclusões foram obtidas:

- a) A simulação numérica de radiografia com o sistema de radiografia digital com detector de alta sensibilidade Imaging PLATE visando radiografar virtualmente os isoladores poliméricos de 15 kV desenhado em CAD foi possível de obter utilizando o software CIVA-RT versão 11 com sucesso variando a distância entre a fonte de raios-X e o isolador polimérico de 0,30 cm a 10 m. O tempo de exposição foi de 30 segundos a 60 segundos.
- b) Experimentalmente, visando validar os parâmetros radiográficos obtidos por simulação numérica, imagens radiográficas de alta qualidade foram obtidas utilizando os parâmetros radiográficos de até 1 m e o tempo de exposição de 60s.
- c) Análise dimensional com a precisão $< 2\%$ foi obtida e realce da região de interesse por processamento de imagem digital possibilitou análise detalhada do interior do isolador polimérico.
- d) Embora ainda tenha validado experimentalmente a obtenção de imagens radiográficas do isolador polimérico de 15 kV com distância entre a fonte de radiação e detector IP superior a 1 m, os resultados iniciais mostraram que reproduziram as imagens radiográficas obtidas por simulação numérica. Portanto, devido à alta sensibilidade do detector IP empregado, espera-se que imagens radiográficas de qualidade dos isoladores poliméricos de 15 kV

possam ser obtidas com distância entre a fonte de radiação e o detetor IP até 10 m.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Validar experimentalmente os parâmetros radiográficos obtidos nas simulações numéricas com sistemas de radiografia computadorizado para inspecionar isoladores poliméricos de 15 kV para as distâncias superiores a 1 m entre a fonte de radiação e o isolador polimérico,
- b) Estabelecer um procedimento de inspeção dos isoladores poliméricos novos por imagem radiográfica antes de serem instalados nas linhas de distribuição.
- c) Realizar os testes experimentalmente em campo visando inspecionar os isoladores poliméricos de classe 15 kV energizados instalados nas estruturas de concreto com cabo condutores com revestimento e posteriormente, em isoladores poliméricos com cabo condutor nu,
- d) Determinar um plano de proteção radiológica para inspeção dos isoladores poliméricos de 15 kV novos com radiografia computadorizada no almoxarifado das concessionárias e também para aplicação em campo.

REFERÊNCIAS

ALEKSEYCHUK, A.; ZSCHERPEL, U. **ISee!**. BAM Division 8.3. Disponível em: <http://www.uzscherpel.de/BAM/ic/index.html>. Acesso em: 24 jun. 2020.

ALUMA-FORM. **HDPE Insulator Catalog**. Disponível em: https://www.alumaform.com/uploads/7/3/0/1/73010353/hdpe_insulator_catalog_december-2019-v2.pdf. Acesso em: 30 jul. 2020.

AMEMIYA, Y.; ARNDT, B.; BURAS, B.; CHIKAWA, J.; GERWARD, L.; LANGFORD, J.I.; PARRISH, W.; WOLFF, P.M. Detectors for X-rays. **International Tables for Crystallography** (2006). Vol. C, Chapter 7.1, pp. 618-638.

AMEMIYA, Y.; MIYAHARA, J. Imaging plate illuminates many fields. **Nature** 336, 89–90 (1988). <https://doi.org/10.1038/336089a0>

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 09 ago. 2007.

ASTM INTERNATIONAL E2007-10 (Reapproved, 2016), **Standard Guide for Computed Radiography**.

BARBOSA, S.C.; MACEDO, I.P. **Novos ensaios para isoladores poliméricos tipo pino – caso CELPE**. 2004. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/congressos/CISEMALIE2005/cittes/distribucion/BR%20-%20BARBOSA%20-%20CEPELE%20%20TRABALHO%20COMPLETO%20-NOVOS%20ENSAIOS%20PARA.pdf>. Acesso em: 31 out. 2020.

BONOMO, A. **Estudos sobre isoladores poliméricos à base de resinas poliuretanas pra ambiente externo**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. 129 f.

BRITO, K. B.; COSTA, E. G.; OLIVEIRA NETO, A. B.; DIAS, B. A.; FERREIRA, T. V. **Avaliação de degradação de isoladores poliméricos baseada em imagens ultravioletas**. In: VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE. Natal-RN. 22-25 de Maio de 2016.

CIGRÉ-BRASIL. Grupo de Trabalho B2.03. **Critérios de avaliação de isoladores em serviço**. Setembro, 2008.

CIVA NDE 11, CIVA 11 User Manual – DISC Département d’Imagerie Simulation et Contrôle.

COOLEY, J. **Asa Clean Purging Compound**. Disponível em: <https://blog.asaclean.com/3-causes-of-voids-in-your-injection-molded-parts>. Acesso em: 5 Abr. 2020.

DOKIC, T.; DEHGHANIAN, P.; CHEN, P.; KEZUNOVIC, M.; MEDINA-CETINA, Z.; STOJANOVIC, J.; OBRADOVIC, Z. **Risk Assessment of a Transmission Line Insulation Breakdown Due to Lightning and Severe Weather**. In: *49th Hawaii*

International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI, 2016, pp. 2488-2497, doi: 10.1109/HICSS.2016.311.

EWERT, U.; ZSCHERPEL, U.; BAVENDIEK, K. **Replacement of film radiography by digital techniques and enhancement of image quality**. E-Journal of Nondestructive Testing (NDT) ISSN 1435-4934 (NDT.net Journal). 2007.

FAGUNDES, R. C. **Avaliação de acessórios poliméricos de redes compactas protegidas por meio de ensaio de multiestressamento e simulação computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

FERNANDEZ, R.; SCHUMM, A. **Inspection of complex geometries using radiographic simulation in CIVA**. 2009.

Fuji Photo Film Co Ltd. **Fujifilm Value from Innovation**. Tokyo. Disponível em: <http://www.fujifilm.com>. Acesso em: 07 jan. 2020.

JAENISCH, G. R.; BELLON, C.; EWERT, U. **Simulation supported reliability analysis in radiography**. In: 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11 (ECNDT 2010)

FARIA, F.; BARNABÉ, A.; GUARALDO, N.J.; MACIEL, R.L.C.; MAK, J.; NACAS, J.C. **Novos compósitos para isoladores poliméricos com materiais reciclados**. Instituto CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação. Disponível em: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2017/09/Novos-Comp%C3%B3sitos-para-Isoladores-Polim%C3%A9ricos-com-Materiais-Reciclados.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2021.

FUJIWARA, H.; SHINOHARA, A.H.; SILVA JUNIOR, E.J.; XAVIER, G.J.V.; LOTT NETO, H.B.D.T.; BRITTO, P.R.R.; FONTAN, M.A.B. **In-situ inspection of composite isolators in 500 kV line overhead transmission lines by computed radiography**. In: First World Congress on Condition Monitoring-WCCM, Londres, Inglaterra, 13-16 June 2017.

GODOI, W. C. **Detecção de defeitos em isoladores poliméricos por radiografia digital**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GODOI, W.C.; GEUS, K.; SILVA, R.R.; SWINKA-FILHO, V. **Detecção automática de vazios em isoladores poliméricos por tomografia industrial 3D**. Revista Espaço Energia, Número 11, Outubro 2009.

GODOI, W. C.; SILVA, R. R.; SWINKA-FILHO, V.; LODDI, T. **Desenvolvimento de um Sistema de Radiografia Digital Portátil para a Detecção de Defeitos em Isoladores Poliméricos**. In: CITENEL-ANEEL 2016.

GODOI, W. C.; SWINKA-FILHO, V. **Pattern recognition in the automatic inspection of flaws in polymeric insulators**. Article in OR Insight, October, 2005.

GORUR, R.S.; SHAFFNER, D.; CLARK, W. **Utilities Share Their Insulator Field Experience**. T&D World Magazine, Apr. 2005. Disponível em: <http://tdworld.com/overhead-transmission/utilities-share-their-insulator-field-experience>. Acesso em: 01 nov. 2020.

HALMSHAW, R., Chapter 6 Radiographic techniques principles, In: **Industrial Radiology: Theory and practice**. 2nd edition. Chapman&Hall, 1995.

HENDRIX MOLDED PRODUCTS. **TIE TOP Pin Insulators**. Disponível em: http://www.hivoltinsulators.com/detail.php?id=39&gclid=CjwKCAjwoc_8BRACeiwAzJevtTTCm6q9mjbzNRDavmQr3adv0ve2jvRebdgoN7FHEDqnhwBSq8uCLxoCHn4QAvD_BwE. Acesso em: 30 jul. 2020.

HIVOLT. **HDPE Insulators**. Disponível em: <http://www.hivoltinsulators.com/detail.php?id=29>. Acesso em: 25 jul. 2020.

KELLER, W. J.; PESSIKI, S. **Experimental Validation of a numerical model for simulating radiographic imaging of Portland cement-based materials**. J NondestructEval (2015) 34:18, DOI 10.1007/s10921-015-0291-y. Springer Science+Business Media New York 2015.

LEMAIRE, H.; TISSEUR, D.; RATTONI, B.; VIENNE, C.; GUILLAMET, R.; COLOMBIE, V.; CATTIAUX, G.; SOLLIER, T. **Validation of CIVA RT module for nuclear applications**. In: 12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Dubrovnik 4-6 October, 2016 (JRC-NDE 2016).

LOPES, B. R. F. **Estudo da criticidade de cavidades internas a isoladores poliméricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

LOTT NETO, H. B. D. T.; FONTAN, M. A. B.; BRITTO, P. R. R.; SHINOHARA, A. H.; SILVA JUNIOR, E. J.; XAVIER, G. J. V.; FUJIWARA, H. **Inspeção in-situ dos isoladores poliméricos de 500 kV em linha de transmissão energizada por radiografia digital computadorizada**. In: XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Curitiba, 22-25 de outubro de 2017.

MARTINS, R. **Desenvolvimento de isolador polimérico inteligente**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MCNPX. **Los Alamos National Laboratory**. Disponível em: <https://mcnp.lanl.gov/>. Acesso em: 05 mai. 2021.

MELLO, D.R. **Siklowatt Isoladores**. Disponível em: <http://www.siklowatt.com.br/site/wp-content/uploads/2018/12/SIKLO-Apresenta%C3%A7%C3%A3o-Isoladores-Compostos-Darcy-Ramalho-2018>. Acesso em: 10 abr. 2020.

MENDONÇA, P. L. **Diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em isoladores compósitos de classe de tensão de 69kv através de radiografia**

computadorizada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

MENDONÇA, P.L.; DANTAS, J.L.P.; BEZERRA, J.M.B.; AQUINO, R.R.B.; SILVEIRA, T.M.A. **Aplicação de sensor de ultra-som na manutenção de subestações e linhas de transmissão e distribuição a partir de redes inteligentes.** In: SENDI-18 Seminário nacional de distribuição de energia elétrica. Olinda-PE. 2008.

MENDONÇA, P.L.; SHINOHARA, A.H. **A experiência da Celpe no uso da radiografia digital como técnica de diagnóstico de falhas em materiais poliméricos.** In: 25 Congresso Brasileiro de Manutenção, Bento Gonçalves-RS. ABRAMAN, 2010.

MIYAHARA, J. **Imaging plate.** In: Tateno Y., Takano M. (eds) Computed Radiography. Springer, Tokyo.

NDT Resource Center. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/definition.htm>. Acesso em: 13 fev. 2020.

NDT Resource Center. Sources of Attenuation. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/attenuation.htm>. Acesso em: 16 fev. 2020.

ORIENT POWER. **ANSI 55-4.** Disponível em: <http://www.pin-insulators.com/ANSI-55/ANSI-55-4-porcelain-pin-insulatorsceramic-pin-type-insulator.html>. Acesso em: 30 jul. 2020.

PAPAILIOU, K. O.; SCHMUCK, F. **Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

PEAKDEMAND UTILITY PRODUCTS. **HDPE Pin Tie-Top Insulators.** Disponível em: <https://peakdemand.com/wp-content/uploads/Product-Sheet-Pin-HDPE.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2020.

PINGXIANG HUACI INSULATOR GROUP CO., LTD. Disponível em: <https://www.huaciinsulator.com/product/porcelain-pin-insulators-ansi-55-4/>. Acesso em: 30 jul. 2020.

PINTEREST. Disponível em: <https://br.pinterest.com/pin/289004501078486385/>. Acesso em: 13 fev. 2020.

PREFORMED Line Products. Disponível em: <https://preformed.com/>. Acesso em: 25 Mai. 2021.

ROBERTS, G.R., GRAHAM, J.P. **Computed Radiography**, v. 17, n.1, April 2001, Modern Diagnostic Imaging, 2001.

ROYAL INSULATORS & POWER PRODUCTS. **HDPE PIN Insulator**. Disponível em: <https://www.royalinsulator.com/hdpe-pin-insulator/>. Acesso em: 30 jul. 2020.

SABAT, A.; KARMAKAR, S. **Simulation of partial discharge in high voltage power equipment**. In: International Journal on Electrical Engineering and Informatics. Vol. 3. N. 2. 2011.

SCHUMM, A.; ZSCHERPEL, U. **The EN584 standard for the classification of industrial radiography films and its use in radiographic modeling**. In: 6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, Budapest, Hungary, 2007.

SEMPAU, J.; ACOSTA, E.; BARO, J.; FERNANDEZ-VAREA, J.M.; SALVAT, F. **An algorithm for Monte Carlo simulation of the coupled electron-photon transport**. Nucl. Instr. and Meth. B 132, pp.377- 390, 1997.

SENDUO. Pin Type Insulators. Disponível em: http://www.sdinsulator.com/product/11kv-ceramic-pin-insulator_55-4.html. Acesso em: 30 jul. 2020.

SHINOHARA, A. H.; ACIOLI, E.; KHOURY, H. J. **Avaliação da técnica de radiografia digital em gamagrafia**. In: 6ª COTEQ - Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador, agosto, 2002.

SHINOHARA, A. H.; SANTANA, D. M. DE F.; OLIVEIRA, P.P.J. .; SILVA, R.G.; MAGALHÃES, O. H.; SILVEIRA, C. G.; KHOURY, H.J.; WAVRIK, J.F.; BRANCO, F. M. A. C.; LEITE, M. A.; GALINDO, T. C. L. **Defects detections in electrical insulators and breaker for high voltage by low cost computed radiography systems**. In: Internacional Symposium on Digital industrial radiology and Computed tomography- DIR2007, Lyon-França. Internacional Symposium on Digital industrial radiology and Computed tomography- DIR, 2007.

SHINOHARA, A. H.; FUJIWARA, H.; XAVIER, G. J. V.; SILVA JUNIOR, E. J.; 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 materials**. In: 12th European Conference on Non-Destructive Testing (12th ECNDT), Gothenburg-Suécia, 2018.

SHINOHARA, A. H.; SILVA JUNIOR, E. J.; XAVIER, G. J. V.; FUJIWARA, H.; LOTT NETO, H. B. D. T.; BRITTO, P. R. R.; FONTAN, M. A. B. **Sistema radiográfico digital para detecção de defeitos internos em isoladores poliméricos em linhas de transmissão de 500 kV energizadas**. In: The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2017c.

SHINOHARA, A. H.; SILVA JUNIOR, E. J.; XAVIER, G. J. V.; FUJIWARA, H.; NONAKA, J.; LOTT NETO, H. B. D. T.; BRITTO, P. R. R.; FONTAN, M. A. B. **Sistema Radiográfico Digital para Detecção de Falhas Mecânicas Ocultas nos Isoladores Poliméricos em Linhas de Transmissão de 500 kV Energizadas**. In: IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL-ANEEL) e V Seminário de Eficiência Energética do Setor Elétrico (SEENEL) 2017a.

SHINOHARA, A.H.; SILVA JUNIOR, E.J.; FUJIWARA, H.; XAVIER, G.J.V.; LOTT NETO, H.B.D.T.; BRITTO, P. R.R.; FONTAN, M.A.B. Desenvolvimento e testes de um sistema radiográfico digital para inspeção da integridade dos isoladores poliméricos em linha de transmissão de 500 kV energizada. In: XVII ERIAC Décimo Séptmo Encuentro Regional Ibero Americano de CIGRÉ, cidade Del Este - Paraguai, 2017b.

SILVA, P.P.J.C, SHINOHARA, A.H., PACHÊCO, A.P., CASTRO FILHO, Z.P., MONTEIRO, S.L.P. **In-Service Aged Composite Insulators at Transmission Line Investigated by the Micro-Computerized Tomography**. Materials Transactions, Vol.53, No.4 pp.617 to 620, 2012.

SILVA, P. P. J. C. G. P. O. **Inspeção da degradação nos isoladores de compósito de linhas de transmissão através de ensaios não destrutivos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SILVA, S. H. M. **Aplicação de técnicas de elementos finitos para mapeamento de campos elétricos sobre cavidades internas a isoladores poliméricos de 13.8 kV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SUWANASRI, C.; THAWONSUKANAN, P.; RUANKON, S.; SUWANASRI, T. **Partial discharge detection in high voltage equipment using high frequency current transducer**. Greater Mekong Subregion Academic and Research Network, p. 53, 2013.

TAKANO, M. Introduction. In: TATENO Y., IINUMA T., TAKANO, M. **Computed Radiography**. 1 ed. Springer Japan, 1987. ISBN: 978-4-431-66884-8. cap. 1, p. 3-6.

TATENO Y., IINUMA T., TAKANO, M. **Computed Radiography**. 1 ed. Springer Japan, 1987. ISBN: 978-4-431-66884-8.

TISSEUR, D.; COSTIN, M.; MATHY, F.; SCHUMM, A. **Simulation of computed radiography with imaging plate detectors**. AIP Conference Proceedings **1581**, 1861 2014; <https://doi.org/10.1063/1.4865050>

VICENTINOS. **Catálogo de produtos 2020**. Disponível em: <https://www.vicentinos.com.br/catalogo/>. Acesso em: 31 Out. 2020.