

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

JOSÉ FELIPE ANDRÉ GOMES WAVRIK

Desenvolvimento de um Sistema de Radiografia Computadorizado para Inspeção da
Integridade do Cabo junto ao Grupo de Suspensão em Linhas de Transmissão
Energizadas

Recife
2011

JOSÉ FELIPE ANDRÉ GOMES WAVRIK

Desenvolvimento de um Sistema de Radiografia Computadorizado para Inspeção da Integridade do Cabo junto ao Grupo de Suspensão em Linhas de Transmissão Energizadas

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

Área de concentração:
Materiais e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki
Shinohara

Recife
2011

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

W356d Wavrik, José Felipe André Gomes.
Desenvolvimento de um Sistema de Radiografia Computadorizado
para Inspeção da Integridade do Cabo junto ao Grampo de Suspensão em Linhas
de Transmissão Energizadas / José Felipe André Gomes Wavrik - 2011.
50folhas.

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2011.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Radiografia computadorizada. 3. Ensaios
não-destrutivos. 4. Integridade estrutural. 5. Linhas de transmissão energizada.
6. Subestações. I. Shinohara, Armando Hideki. (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-351

JOSÉ FELIPE ANDRÉ GOMES WAVRIK

Desenvolvimento de um Sistema de Radiografia Computadorizado para Inspeção da Integridade do Cabo junto ao Grampo de Suspensão em Linhas de Transmissão Energizadas

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

Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara (UFPE)
Orientador

Prof. Dr. Marcos Pereira (UFPE)
Examinador Interno

Prof. Dr. Adilson da Penha Pacheco (UFPE)
Examinador Externo

Aprovado em: __09__ / __09__ / __2011__.

Dedico este trabalho em memória a meus pais **Carlos Wavrik e Elza André Gomes Wavrik** os pioneiros e mais assíduos professores de minha vida, que me ensinaram mais que qualquer pessoa, que me deram base para concluir mais uma etapa importante da minha vida e a quem eu jamais terei palavras suficientes para expressar todo meu amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara, pelos ensinamentos, sugestões, tranquilidade repassadas durante suas orientações.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - PPGEM da Universidade Federal de Pernambuco.

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, por ter sido o gerente do projeto de P&D e ter cedido às amostras utilizadas neste trabalho.

Ao Institute for Materials and Testing, Berlin – Alemanha – BAM, por ter fornecido dados dos ensaios realizados através de radiografia computadorizada e micro-tomografia.

À COMPOENDE, Tremembé – SP, por disponibilizado seu laboratório para a realização das radiografias pelo método convencional.

À Sra. Eliane Alves da Silva, secretária do Programa de pós-graduação da UFPE.

Ao professor Dr. Ricardo Tadeu Lopes – UFRJ, por ter gentilmente cedido o IQI de fios duplos.

Ao professor Dr. Adilson da Penha Pacheco por ter autorizado o uso de imagens termográficas do isolador de compósito.

A colega Flávia Brasileiro por ter ajudado nos trabalhos de digitalização das imagens.

Ao colega Pietro Paolo Jorge por ter contribuído com informações a respeito de fraturas em isoladores.

Aos professores das disciplinas do curso de mestrado, pelos ensinamentos repassados.

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

A todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram para a conclusão do mestrado.

À minha esposa Rosineide Wavrik e filhos: Fabiana, Felipe Filho, Fernando, Marina, Jennifer, Jonathan e Mário por entenderem minha ausência nas horas de estudo.

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

Albert Einstein

RESUMO

No presente trabalho, são apresentados resultados inéditos obtidos com um sistema de radiografia computadorizada de concepção inovativa de baixo custo, que foi desenvolvido no projeto de pesquisa P&D e testado com sucesso para a inspeção da integridade dos cabos em condição energizada das linhas de transmissão de 230 kV, junto ao grampo de suspensão no campo. O detetor de imagem radiográfica utilizado é de altíssima sensibilidade denominado de *Imaging Plate*. Como resultado, obteve-se imagens radiográficas digitais de alta qualidade do cabo condutor junto ao grampo de suspensão e verificou-se também que é um processo de inspeção de alta produtividade. O sistema de radiografia computadorizada foi também utilizado com sucesso na inspeção de defeitos em isoladores de compósito de linha transmissão e nos problemas de funcionamento em cilindro de disjuntor hidráulico-pneumático de subestações. Ademais, devido altíssima sensibilidade do detetor de imagem *Imaging Plate* empregado, o sistema é também bastante interessante de ponto de vista de proteção radiológica porque reduz substancialmente a área de balizamento e principalmente a exposição dos operadores à radiação ionizantes.

Palavras-chave – Radiografia computadorizada. Ensaios não-destrutivos. Integridade estrutural. Linhas de transmissão energizada. Subestações.

ABSTRACT

In the present work an innovative and high sensitive digital system of low cost was developed and results of testing in the laboratory and in the field of conductor cable are shown. Inspection of the integrity of the conductor cables at suspension clamp in the energized condition of the transmission lines of 230 kV. For development of present system, a high sensitivity radiography image detector known as Imaging Plate was employed. As a result, high quality digital radiographic images were obtained to inspect the cable and it was also found to be a high productivity inspection process. The computerized radiography system has also been successfully used to detect defects in composite insulators, also bad function a hydraulic-pneumatic substation circuit breaker. In addition, due to the extremely high sensitivity of the image detector Imaging Plate employed, the system is also quite interesting from a radiological protection point of view because it substantially reduces a beacon area and mainly the exposure of operators to ionizing radiation.

Keywords - Computerized radiography. Non-destructive tests. Structural integrity. Energized transmission lines. Substations.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	REVISÃO DE LITERATURAS	12
2.1.	FALHA DO CABO CONDUTOR ACSR POR MECANISMO DE FADIGA FRETTING.....	12
2.2.	PRINCÍPIO DE RADIOGRAFIA DIGITAL COM IMAGING PLATE	13
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
4.	AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA	26
4.1.	ISOLADORES DE VIDRO	26
4.2.	ISOLADORES DE COMPÓSITO – POLIMÉRICO	32
4.3.	CILINDROS ACUMULADORES DO DISJUNTOR	35
5.	RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE CABO ENERGIZADO JUNTO AO GRAMPO DE SUSPENSÃO	36
5.1.	PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL DE CABOS CONDUTORES.....	36
5.1.1.	Cabo com falha simulada	36
5.2.	RADIOGRAFIA INDUSTRIAL DIGITAL DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DA CHESF	38
5.2.1.	Cabos com ferragens para linhas de transmissão	38
5.3.	TESTE INICIAL NO CAMPO DO SUPORTE ISOLANTE PARA FIXAÇÃO DO DETECTOR DIGITAL IP E UMA FONTE DE RAIOS-X COMPACTA PARA RADIOGRAFAR EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.....	42
5.3.1.	Ensaio com linha de transmissão	42
6.	CONCLUSÕES.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47
	APÊNDICE A – TRABALHOS PUBLICADOS.....	49
	APÊNDICE B – TRABALHOS PREMIADOS.....	50

1. INTRODUÇÃO

A desverticalização e a regulação do setor elétrico estabelecidas no País modificaram os fundamentos mercadológicos da transmissão de energia elétrica no Brasil. A transmissão de energia passou a ser remunerada pela "disponibilidade em servir ao sistema", independentemente da quantidade de energia transportada [1].

Para que as companhias elétricas possam atuar dentro deste novo cenário, por exemplo, embora uma linha de transmissão de energia elétrica seja projetada para atender um longo período de operação, agora, passa a ser de fundamental importância que os componentes vitais, os quais operam em condições de agressividade atmosférica e do solo, sejam inspecionados periodicamente para avaliar se estão dentro dos padrões de qualidade adequados. Por outro lado, sabe-se que boa parcela das linhas de transmissão e subestações do sistema elétrico brasileiro está em operação há várias décadas. Por exemplo, cabos condutores junto ao grampo de suspensão estão sujeitos à falha por fadiga que levam ao rompimento dos tentos de alumínio devido ao processo de encruamento, principalmente no interior do cabo que é de difícil de visualização e posteriormente, levar ao chão, interrompendo o fornecimento de energia elétrica. Portanto, a inspeção da integridade estrutural do cabo junto ao grampo de suspensão é de fundamental importância. O método de inspeção atual consiste em programar o desligamento da linha de transmissão e, para verificar se há ou não tentos partidos no interior do cabo, os técnicos utilizam ferramentas tais como chaves-de-fenda para afastar os tentos externos do cabo para que possibilite a visualização. Neste processo tradicional de inspeção, mesmo que não haja tentos partidos, tal processo pode introduzir danos, inclusive a fratura, em função do encruamento cíclico do material devido ao tempo de operação. Para atender o novo cenário de regulamentação do setor elétrico, é desejável de que a inspeção dos cabos junto ao grampo de suspensão seja realizada em condição energizada, de forma não destrutiva e principalmente, sem a necessidade dos técnicos atuarem ao potencial. Dentre as técnicas de ensaios não destrutivos, a radiografia é uma técnica bastante interessante devido à possibilidade de inspecionar falhas no interior dos cabos por imagem de alta qualidade atendendo as condições acima.

A inspeção radiológica para avaliar a integridade estrutural tem uma tradição de mais de 100 anos. Desde a descoberta de raios-X, filmes de raios-X de alta

resolução têm sido desenvolvidos, que podem ser expostos à radiação por um tempo relativamente longo até atingir a densidade óptica 5, bem como detectar falhas com dimensões inferiores a 12 micra. Em paralelo, com o avanço da tecnologia da microeletrônica e conhecimento e a utilização de efeitos de luminescência em cristais, detectores de radiação ionizantes inovativos e de alta sensibilidade tais como *Imaging Plate* (IP) tem sido desenvolvido, aliado ao advento de computadores cada vez mais velozes e baratos, têm possibilitado o desenvolvimento e aplicações em substituição à radiografia industrial convencional devido a uma série de vantagens técnicas tais como:

- Alta sensibilidade à radiação,
- Não requer uso de produtos químicos para obter a imagem radiográfica e nem câmara escura,
- Possibilita processamento da imagem para realçar detalhes de interesse,

Ademais, em função da alta sensibilidade do sistema de detecção, é considerado bastante interessante do ponto de vista da proteção radiológica [2-6].

No presente projeto de pesquisa, visando explorar a potencialidade aplicativa da tecnologia do IP no setor elétrico de alta tensão, especificamente em linhas de transmissão e subestação, um sistema de radiografia computadorizada de concepção inovativa e de baixo custo foi desenvolvido para inspecionar através de imagens radiográficas de alta qualidade. Para o desenvolvimento do protótipo, inicialmente, visando avaliar a sensibilidade e resolução do sistema de radiografia computadorizada, estudos foram realizados com isoladores de vidro íntegro e com a parte vítrea fraturada, assim como, com isolador de compósito. Após os testes em laboratório, ensaios de inspeção da integridade dos cabos de linhas de transmissão junto ao grampo de suspensão em condição energizado e disjuntores de subestações foram conduzidas no campo com sucesso.

Nesta dissertação, será apresentada a descrição de resultados de imagens radiográficas digitais de alta resolução obtidas com um sistema de radiografia computadorizada desenvolvido para inspeção de falhas no cabo condutor de eletricidade junto ao grampo de suspensão na linha de transmissão de 230 kV energizada.

2. REVISÃO DE LITERATURAS

2.1. FALHA DO CABO CONDUTOR ACSR POR MECANISMO DE FADIGA FRETTING

Fretting” é um processo especial de dano que ocorre no contato entre superfícies de dois materiais sob carregamento e sujeitos a rápidos movimentos por vibração ou outro carregamento externo força, causando micro deslizamentos (tipicamente, 5-50 μm) na área de contato com conseqüente iniciação e propagação de trinca na região do contato, um fenômeno conhecido como fadiga por “fretting”.

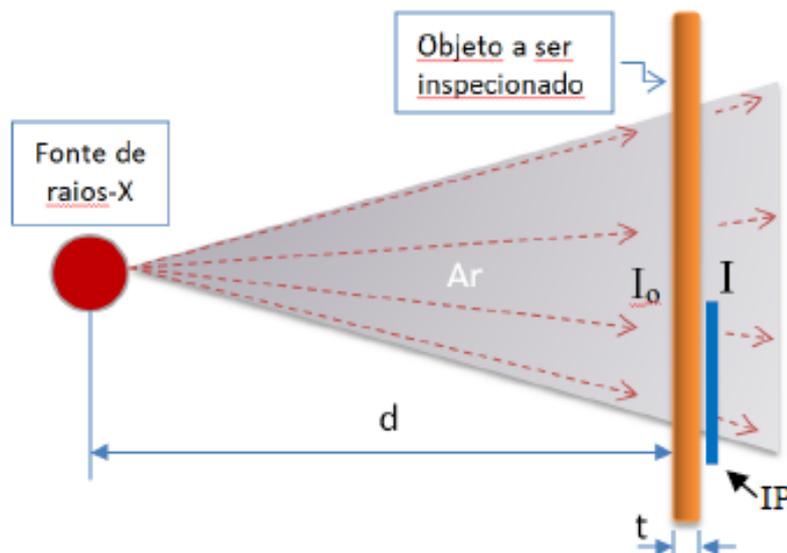
Fadiga por fretting é um importante mecanismo de danos encontrado nas indústrias aeroespacial, automobilística, linhas de transmissão & distribuição, e de diversos setores metal mecânico.

O objetivo deste trabalho é estudar os aspectos fundamentais associados à fadiga por “fretting”, através do método numérico dos elementos finitos e do modelamento de um ensaio de fadiga por “fretting” à flexão. Neste trabalho, o modelo foi construído utilizando-se o aplicativo ANSYS 5.5, tendo por base um ensaio experimental de fadiga por “fretting” descrito na literatura. O modelo permitiu obter a distribuição de tensão, deformação e micro deslizamentos na superfície de contato e observar os sítios preferências para iniciação de trincas por fadiga por “fretting”. Através deste modelo estudou-se a distribuição das tensões, deformações, amplitude de deformação total e média, e a distribuição da pressão de contato ao longo da largura de contato, atuantes na superfície. Ao final deste trabalho [7] é construído uma tabela que mostra a posição onde provavelmente surgirão as trincas por fadiga convencional ou por fadiga por “fretting”, bem como o seu correspondente número de ciclos. Com os dados desta tabela, é possível construir um gráfico que mostra a relação entre a força total de contato e a força total de flexão, em que a falha provavelmente surgirá. Conclui-se que a borda do contato é o local onde apresenta as condições ideais para o provável surgimento das trincas por fadiga por “fretting”, e que o aumento da pressão de contato, torna este local ainda mais apropriado ao seu surgimento.

2.2. PRINCÍPIO DE RADIOGRAFIA DIGITAL COM IMAGING PLATE

Em radiografia, o princípio do uso da radiação ionizante para a inspeção de estruturas e defeitos internos num objeto de interesse mantém-se inalterado há mais de 120 anos, desde a descoberta dos raios-X em 1895 pelo físico Wilhelm Conrad Röntgen na Alemanha. Em termos de procedimento, o objeto a ser inspecionado deve ficar posicionado entre uma fonte de radiação ionizante e um detetor de imagem, que podem ser um filme de raios-X, imaging plate (IP), detetor eletrônico, por exemplo, *flat panel*. Este método de obter as imagens radiográficas é conhecido também como método de absorção, onde uma parte da radiação atravessa, mas a outra parte é absorvida, como é mostrado esquematicamente na figura 1.

Figura 1. Princípio da radiografia por método de absorção. Entre uma fonte de radiação e detetor (IP) de imagem.



Fonte: O Autor

Atualmente, sabe-se que as radiações ionizantes (raios-X e raios- γ) são ondas eletromagnéticas de mesma natureza da luz visível, mas de comprimento de onda muito menor, da ordem de angstrom (\AA), mas com as propriedades interessantes de conseguir atravessar corpos opacos a luz visível. Ademais, possui a capacidade de ionizar os átomos dos gases, líquido e materiais sólidos. Sabe-se também que a radiação ionizante atravessa com maior facilidade materiais de menor densidade, pois, a 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 pela 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 conseqüentemente, maior capacidade de penetração.

Quando a radiação ionizante incide no objeto de interesse, uma parte atravessa, mas a outra parte é absorvida. A relação entre as intensidades de radiação transmitida (I) e incidente (I_0) é dada pela equação (3):

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

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

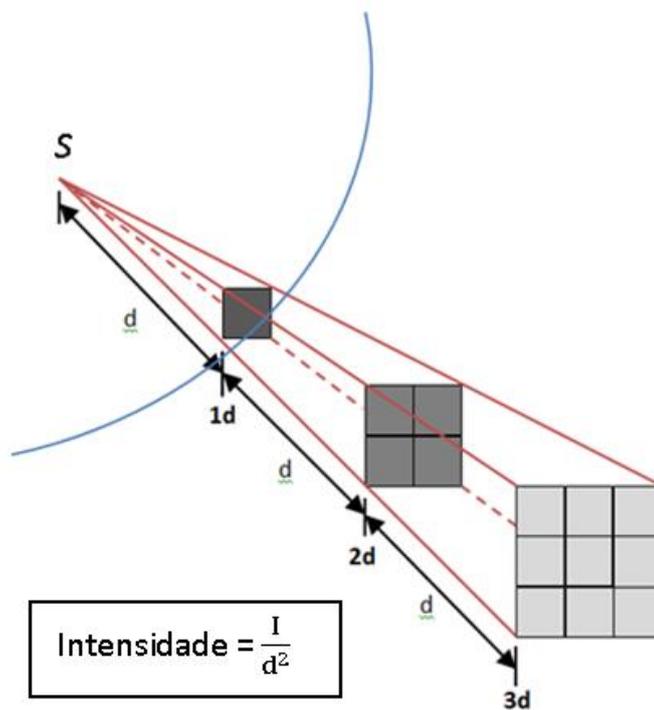
Ademais, sabe-se que quando a radiação ionizante gerada na fonte propaga-se pelo ar, a sua intensidade por área diminui de acordo a lei do inverso de distância de Newton [8-9], dada pela equação (4), a intensidade cai com o quadrado da distância, como é ilustrado na figura 2. A rigor, a referida área 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 2. 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: Ala.Hijazi-RadiographyTesting [9].

Ademais, para obter 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 [8-9] e as normas ISO: 5579, EM-444 e DIN 541111 [10] 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

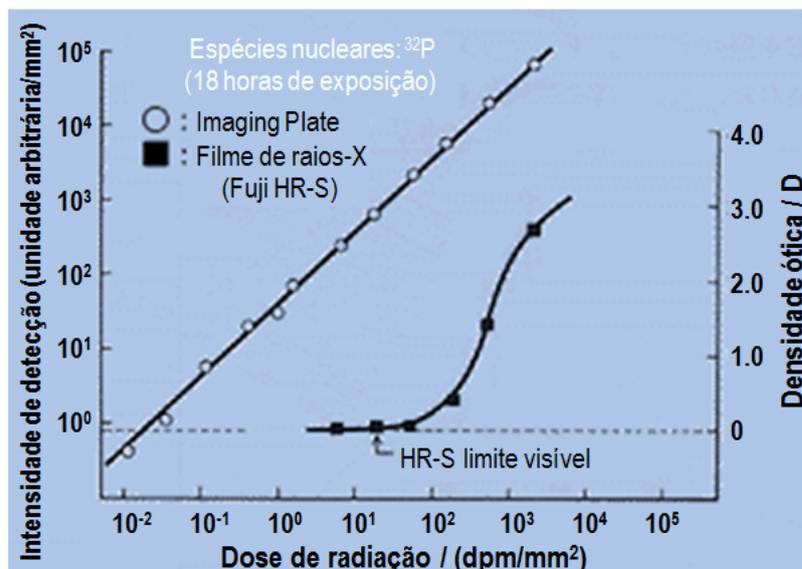
para técnica normal (classe A). A distância entre a fonte de radiação ao detector é dada por $(a + b)$.

Para desenvolvimento do presente projeto, buscou-se a explorar a excepcional sensibilidade da tecnologia do detector de imagem “Imaging Plate (IP)”, que possui em relação ao filme de raios-X tradicional, como mostra a figura 2. Em termos de detectores de radiação ionizante, basicamente existem dois tipos de detectores. Os chamados medidores de pulsos, tais como contador de cintilação e contador proporcional, que medem fótons um a um, são altamente sensíveis e possuem o *dead-time* da ordem de 1 ms. O *dead-time* está relacionado às características construtivas dos detectores e corresponde o tempo em que o detector deixa de medir os fótons da radiação ionizante que chegam. O segundo tipo de detector é o chamado detector integral, tais como filmes de raios-X e câmara de ionização, que fornecem o total de fótons coletados durante a exposição à radiação ionizante através de medidas de outras propriedades físicas, tais como grau de escurecimento e corrente elétrica. Diferente dos detectores de pulso e proporcional, os detectores integrais não possuem o problema de *dead-time*, mas geram relativamente mais ruídos diminuindo assim a relação S/N (sinal/ruído) do detector.

Na década de 1980, visando aplicação médica, a Fuji Film, 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+}) [11]. 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 biológicas com sucesso, que apresentam naturalmente baixa intensidade de difração, espalhamento de raios-X com radiação síncrotron [11] 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 3 mostra a excepcional sensibilidade e a linearidade do IP em relação ao filme

de raios-X convencional, quando ambos foram submetidos a diferentes doses de radiação ionizante. A abscissa corresponde a doses de radiação emitidas por uma amostra padrão de ^{32}P (radiação beta de energia $E = 1,7 \text{ MeV}$).

Figura 3. 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: Fuji Film. Co. Ltd [12].

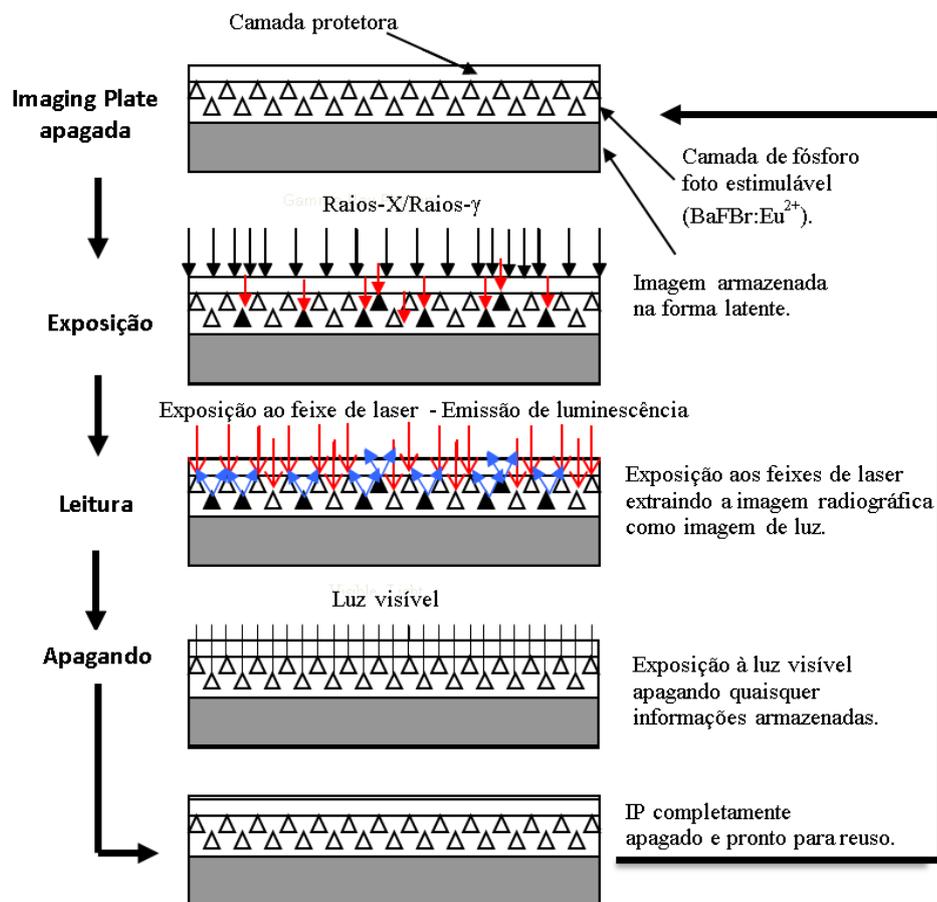
O eixo da ordenada à esquerda representa a quantidade de radiação luminescente acumulada pelo IP e o eixo da ordenada à direita mostra a densidade óptica (grau de escurecimento de um filme de raios-X). Estas características são também similares para feixes de elétrons, raios-X, raios- γ e partículas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

Na figura 4 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 [19]. Após a exposição, a imagem radiográfica fica armazenada na forma latente nos cristais de $(\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+})$, 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 e um efeito para uso em radiografia, denominado de *Imaging Plate* (IP).

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 4. Procedimento simplificado de processamento do uso do Imaging Plate (IP): exposição, leitura, apagamento e reuso.



Fonte: O Autor

Em radiografia, a formação de imagem radiográfica 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. A figura 5 ilustra esquematicamente o efeito da radiação espalhada na passagem de radiação pelo objeto de interesse, que não carrega informações sobre a estrutura interna.

Figura 5. Efeito da radiação espalhada pela matéria na redução do contraste (CIVA-RT).



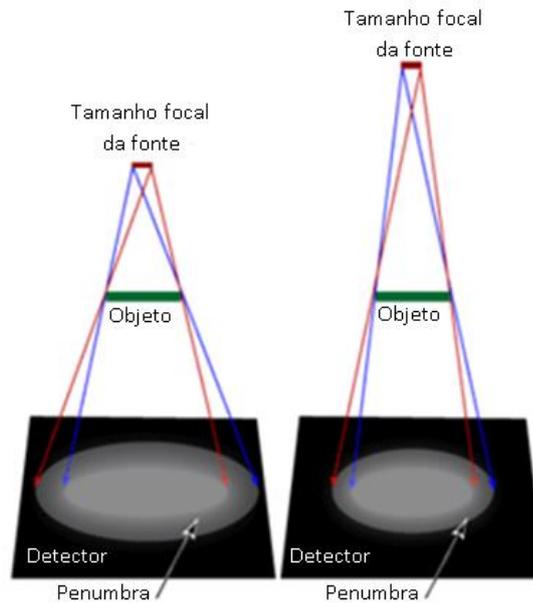
Fonte: Extende CIVA [13].

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

- Penumbra geométrica, U_g , devido à dimensão da origem da fonte de radiação (ponto focal),
- Penumbra do filme, U_f , devido ao espalhamento dos elétrons no filme,
- Penumbra devido ao intensificador de imagem (écran), U_s , causado pelo espalhamento da luz na camada fluorescente,
- Penumbra devido ao movimento, U_{mv} , devido ao movimento relativo do objeto e filme.

Para reduzir o efeito da penumbra geométrica, U_g , visando obter imagem radiográfica de alta qualidade, uma prática interessante é afastar ao máximo a fonte de radiação do objeto de interesse, como mostra a figura esquemática. Neste caso, ocorre a redução da penumbra mas a intensidade de radiação diminui ao quadrado da distância.

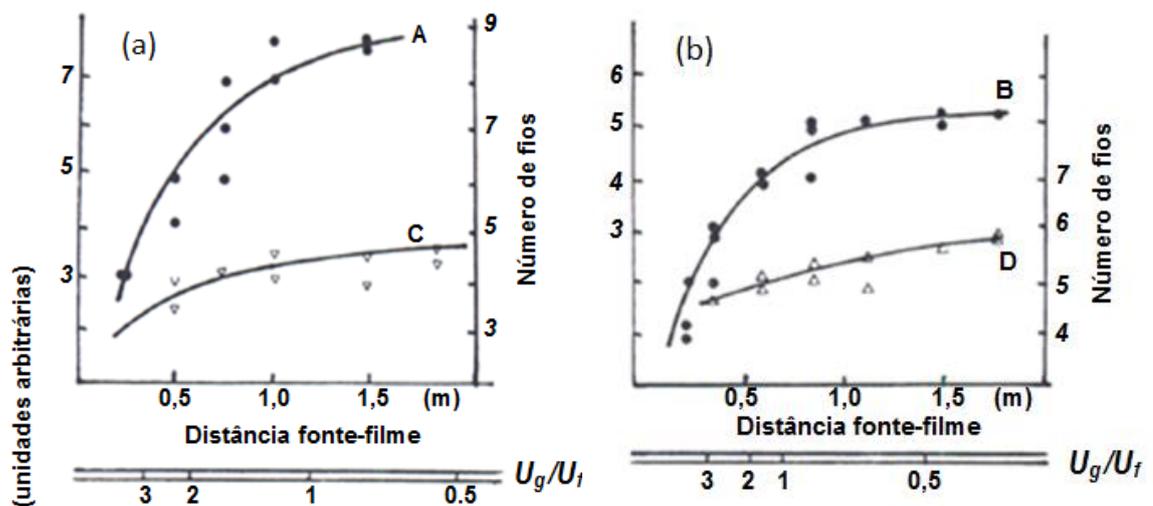
Figura 6. Esquema de penumbra gerada de pelo tamanho focal na origem da fonte de radiação quando a dimensão é finita. Portanto, para aumentar a capacidade de resolução em termos de contraste do sistema radiográfico, afastar a fonte de radiação do objeto de interesse é estratégico[9].



Fonte: Ala.Hijazi-RadiographyTesting [9].

Figura 7. 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 a uma amostra de aço de 25 mm de espessura, uso de raios-X e filme tipo MX da Kodak. O esquema (b) refere-se a 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 [10].



Fonte: R Halmshaw-Industrial Radiology [10].

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

3. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, visou-se desenvolver um sistema de radiografia computadorizada inovativo, de alta resolução espacial e de baixo custo para a inspeção da integridade estrutural do cabo condutor de linha de transmissão de 230 kV energizada junto ao grampo de suspensão de forma não destrutiva dos cabos junto ao grampo de suspensão em condição energizado de uma linha de transmissão, inicialmente, visando a avaliação da sensibilidade e definição do sistema de radiografia computadorizada com o detetor IP, os isoladores de vidro de 10 polegadas de diâmetro, tipicamente empregados em linhas de transmissão de alta tensão, íntegro e com a parte vítrea quebrada, foram radiografados com um sistema de radiografia industrial digital utilizando o IP, uma fonte de irídio-192 de tamanho do foco de 3 mm de diâmetro com 1,5 Ci de atividade. Esta atividade do isótopo é baixa e inadequada para radiografia industrial com filme convencional. Usualmente, a atividade necessária para obter imagem radiográfica com filme industrial deve ter pelo menos 100 Ci. A distância entre a fonte e o detector IP foi mantida em 650 mm. O tempo de exposição foi em torno de 300 segundos. O IP utilizado para coletar as imagens foi de fabricação da Kodak e a leitura de recuperação de imagens radiográficas foi realizada com o escâner a laser denoptix da Gendex, originariamente desenvolvida para aplicação odontológica. O processamento de imagens digitais foi realizado com o software Winvix da Gendex e também com Matlab utilizando a ferramenta IPT – *Imaging Processing Toolbox*.

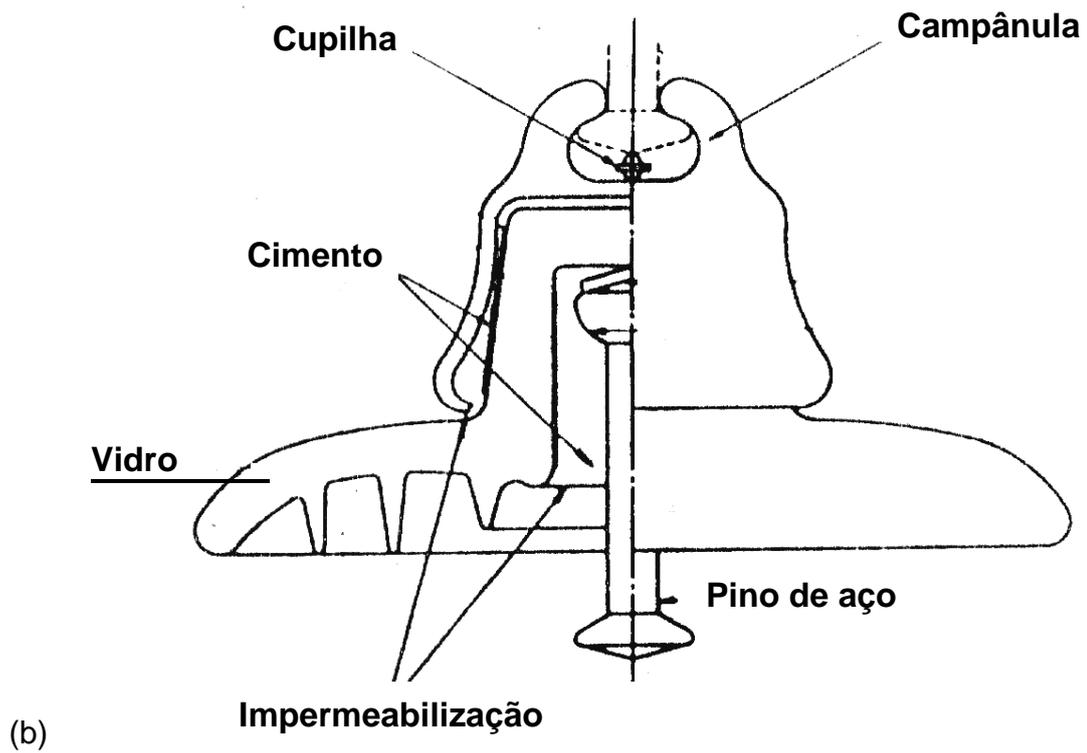
Após os ensaios no laboratório da UFPE, para realizar a inspeção no campo: cabos junto ao grampo de suspensão em linhas de transmissão na condição energizado, e de disjuntores na subestação, um sistema de radiografia computadorizada composto de fonte de raios-X compacta e portátil energizada com baterias e aliado a um escâner portátil da Perkin-Elmer controlado por computador

foi desenvolvido. Neste desenvolvimento, dois tipos de IP foram utilizados (i) SS – *super sensitivity* e (ii) SR – *super resolution*. O tempo de exposição variou de 15 segundos a 30 segundos.

Com respeito ao isolador de vidro, do ponto de vista construtivo, é projetado de tal modo a terem os caminhos na superfície do vidro os mais longos possíveis a fim de diminuir a possibilidade de ocorrência de descarga elétrica entre suas partes metálicas. O pino metálico é fixado ao vidro através de um cimento estrutural. Do ponto de vista elétrico, o vidro é um material de alta rigidez dielétrica e comporta-se como um capacitor equivalente a um circuito RC. A figura 8 mostra uma foto de um isolador de vidro típico empregado no Brasil, assim como esquema construtivo. Um isolador íntegro suporta em torno de 80 kV, enquanto um isolador com a parte vítrea quebrada não suporta mais que 13 kV. A parte vítrea do isolador é um vidro temperado resultando num vidro altamente tensionado que proporciona uma alta resistência mecânica ao impacto, e possui uma resistência mecânica à tração de valores bastante elevados, dependendo do tipo do isolador de vidro, pode suportar mais de 120 kN.

Figura 8. (a) Foto de um isolador de vidro típico de 10 polegadas de diâmetro. (b) Esquema construtivo de um isolador de vidro que mostra o vidro entre a campânula e um pino, ambos metálicos.





Fonte: O Autor

A figura 9 mostra uma foto de um isolador de vidro com a parte vítrea quebrada, que geralmente ocorre por ação de vandalismo no campo.

Figura 9. Isolador de vidro típico com a parte vítrea quebrada ("sabugo").



Fonte: O Autor

Pelo fato do vidro ser temperado, a fratura se propaga em altíssima velocidade e em toda sua extensão causando um efeito de estilhaçamento.

Para complementar o estudo sobre a potencialidade aplicativa do sistema de radiografia computadorizada para inspeção não destrutiva, o ensaio de radiografia computadorizada foi realizado em isolador de compósito utilizado em linhas de transmissão de 230 kV mostrado na figura 10.

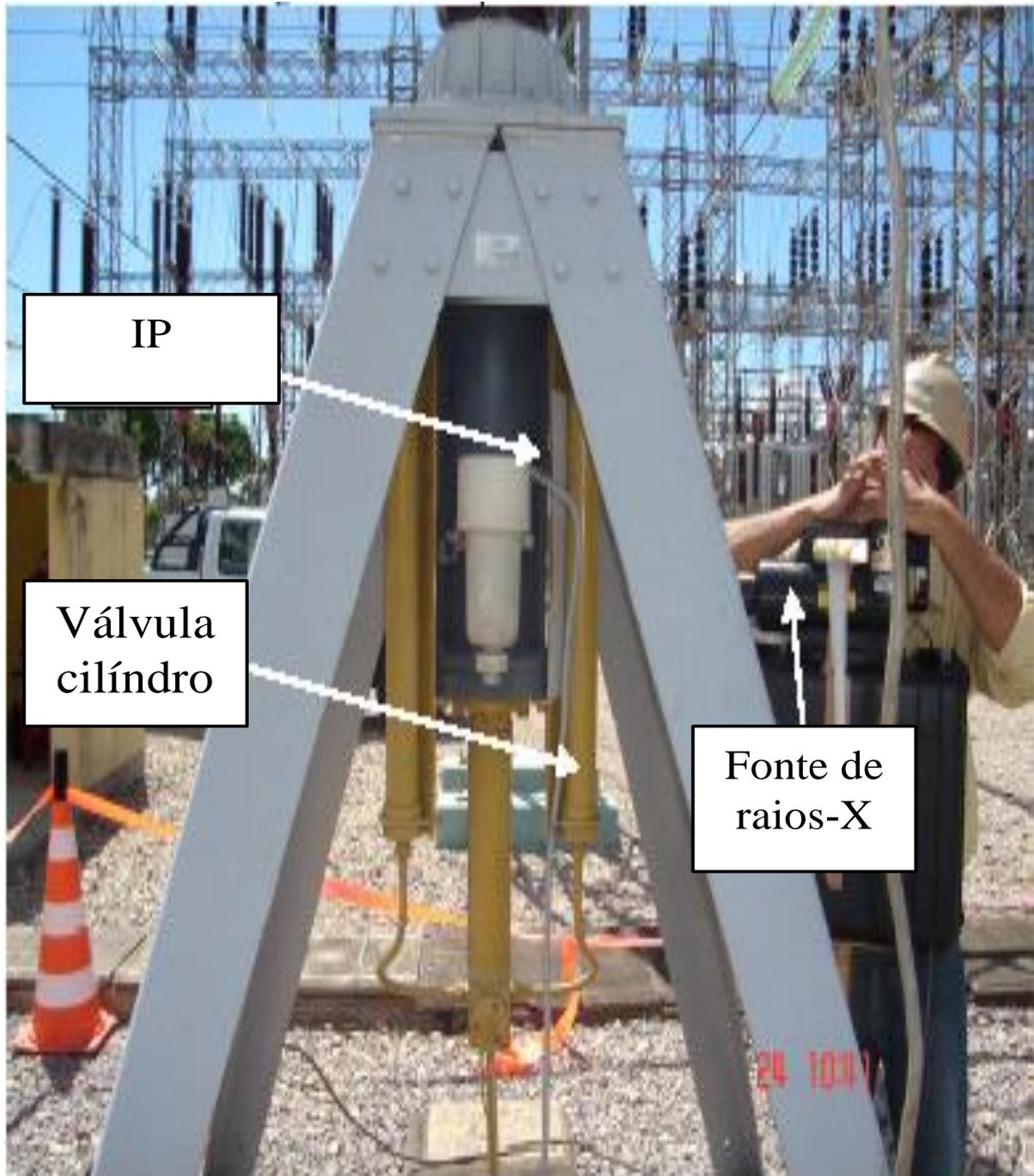
Figura 10. Foto com a vista geral do isolador de compósito, conhecido também de isolador polimérico. Área demarcada é a área que foi radiografada. O comprimento do isolador é uma função da tensão da linha de transmissão. Isolador ensaiado no presente trabalho possui 2.400 mm de comprimento, geralmente empregado numa linha de transmissão de 230 kV.



Fonte: O Autor

Para testes do sistema de radiografia computadorizada desenvolvido no presente projeto de pesquisa P&D no campo, os ensaios foram realizados em disjuntores e, finalmente, no cabo junto ao grampo de suspensão em linha de transmissão em condição energizada, mostrado na figura 11.

Figura 11. Foto mostrando os cilindros (amarela) de um disjuntor de acionamento hidráulico-pneumático de uma subestação.



Fonte: O Autor

Para realizar ensaios no campo com radiografia digital de partes energizadas, isto é, num ambiente de campo elétrico extremamente intenso, para proteger afim de proteger a parte eletrônica mais sensível, o sistema de radiografia computadorizada foi desenvolvido utilizando o princípio de proteção de gaiola de Faraday.

Figura 12. Foto de um cabo junto ao grampo de suspensão no campo radiografado no presente projeto. Nesta foto é mostrada o cabo, o grampo de suspensão e uma parte do isolador de compósito. Contorno em cor vermelha é a área radiografada com o sistema de radiografia computadorizada desenvolvido no presente projeto P&D.



Fonte: O Autor

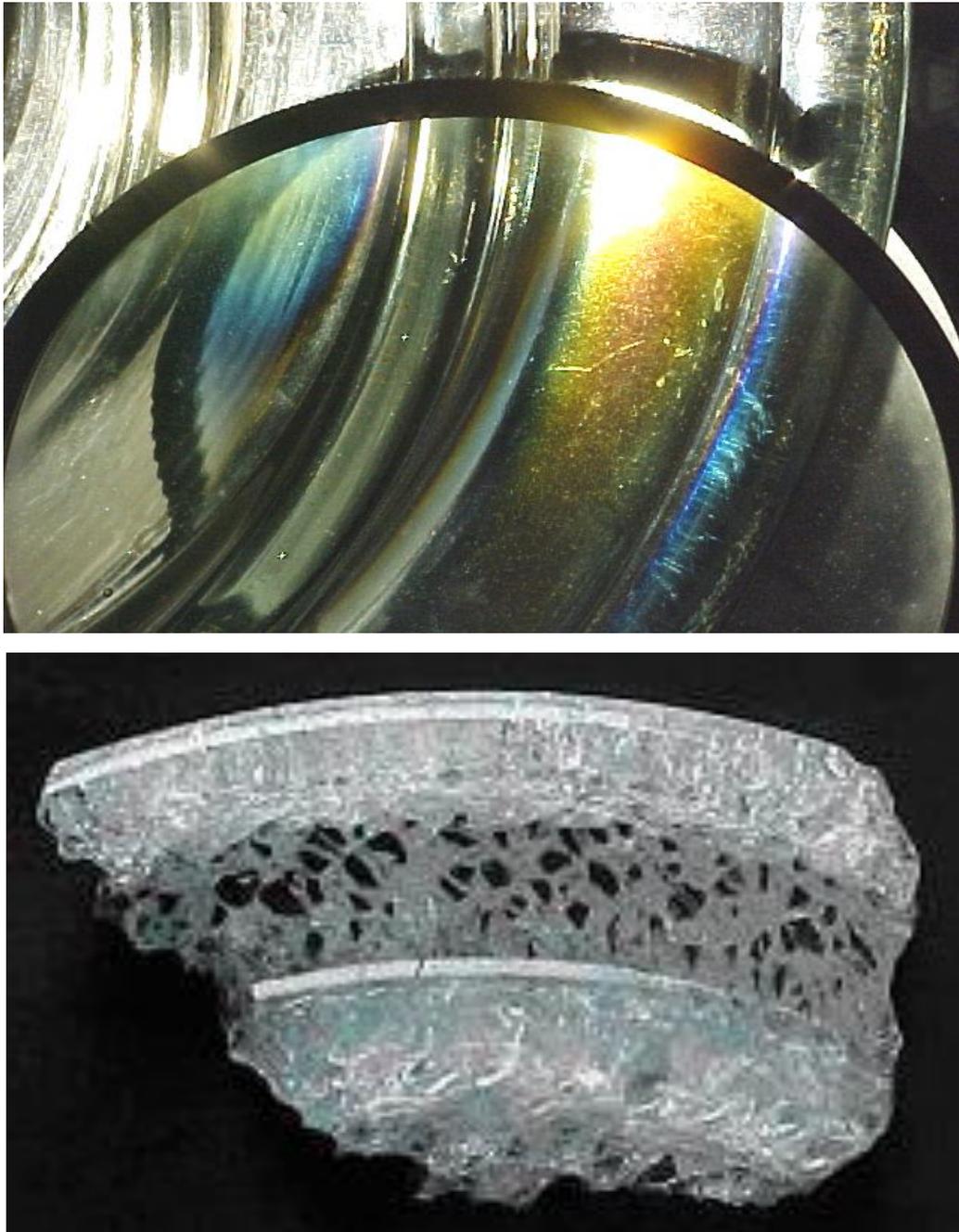
4. AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

4.1. ISOLADORES DE VIDRO

Numa linha de transmissão tradicional emprega-se cadeias de isoladores de vidro compostas por várias unidades de isolador, a qual têm uma função fundamental de isolar eletricamente o cabo energizado da torre metálica que está aterrada, bem como suportar mecanicamente os cabos. No que se refere ao número de isoladores numa cadeia, embora dependa de várias parâmetros tais como condições ambientais do local, depende essencialmente da tensão da linha de transmissão. No Brasil, os isoladores de vidro são largamente e os mais utilizados e possuem histórico e comprovada vida útil superior a 40 anos. Por outro lado, a parte vítrea dos isoladores de vidro são bastante vulneráveis principalmente as danificações/quebras por vandalismo devido ao efeito da têmpera. A figura 13 mostra as franjas coloridas que denotam qualitativamente a tensão residual presente no vidro temperado do isolador quando a luz polarizada é empregada. Quando a parte vítrea do isolador de vidro é quebrada, para aliviar a tensão residual, a fratura

praticamente percorre em toda a extensão do vidro, como está mostrada na figura 13. Analisando a dimensão da largura da fissura das trincas presentes em toda a extensão do vidro, verifica-se que é da ordem micrométrica.

Figura 13. A coloração observada com luz polarizada mostra a tensão residual no vidro devido ao processo de têmpera (acima) e, uma parte do vidro de um isolador após ser quebrado, mostrando um padrão de fratura típico de um vidro temperado (abaixo).



Fonte: O Autor

A figura 14(a) mostra a foto da parte do isolador de vidro íntegro que foi radiografado empregando com a tecnologia IP. As figuras seguintes mostram as imagens radiográficas digitais antes e depois do processamento das imagens radiográficas digitais.

Figura 14. (a) Foto de campânula e parte do vidro de um isolador íntegro. (b) Imagem radiográfica obtida pelo sistema IP. (c) Imagem processada com software comercial utilizando o filtro “emboss”. (d) Imagem processada utilizando filtro “LOG”.

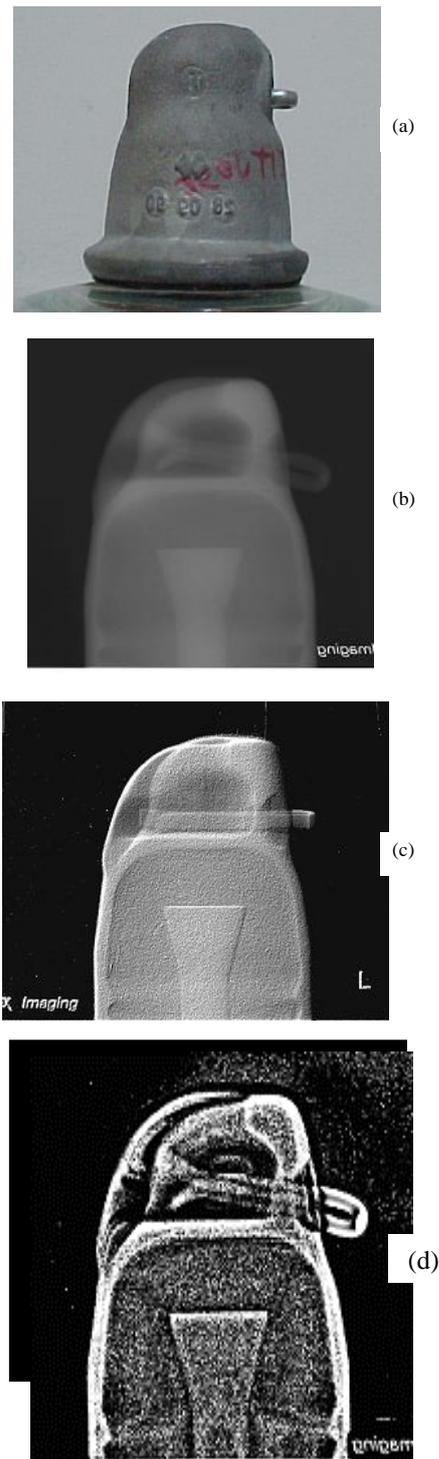
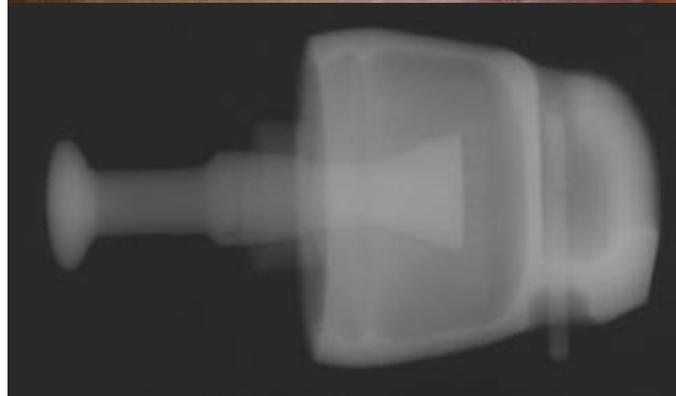


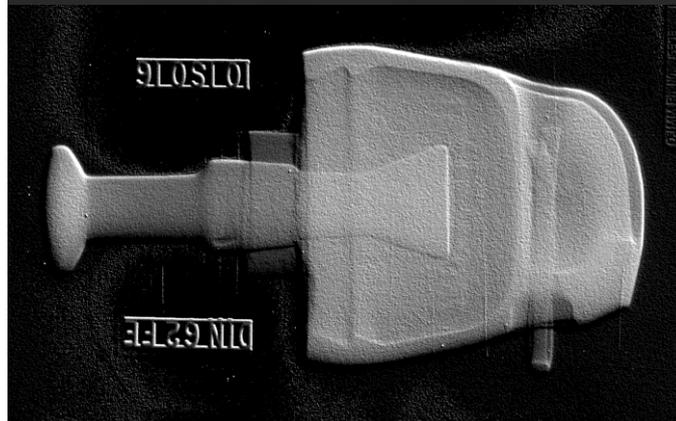
Figura 15. (a) Foto mostrando um isolador quebrado (sabugo). (b) Imagem radiográfica obtida pelo sistema IP. (c) Imagem processada com software comercial utilizando o filtro “emboss”. (d) Imagem processada utilizando o filtro “LOG” evidenciando a textura devido às fraturas do vidro no interior.



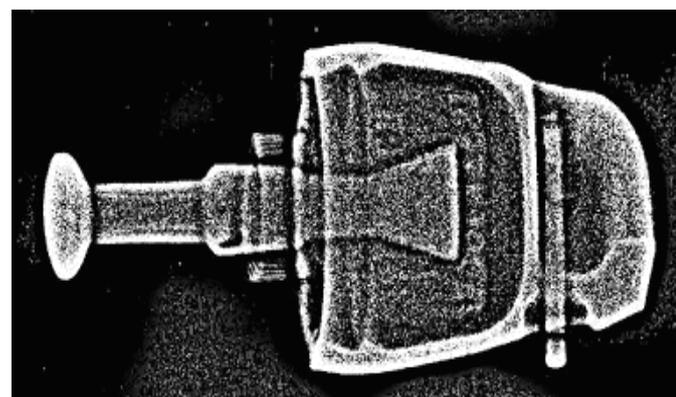
(a)



(b)



(c)



(d)

A figura 15(b) mostra a imagem radiográfica ótima qualidade como foi obtida após a leitura do IP no escâner a laser. Já a figura 15(c) mostra o resultado da aplicação do filtro *emboss* na imagem radiográfica da figura 15(b), realçando e destacando detalhes que não são possíveis de serem observados claramente na imagem original.

A figura 15(d) mostra a aplicação do filtro Laplaciano denominado de LOG, que realça outros detalhes de forma a complementar os resultados obtidos com o filtro *emboss*. Através das radiografias observa-se que a estrutura construtiva de um isolador de vidro é de alta complexidade, que é composta de partes metálicas (campânula, cupilha e pino), vidro e cimento estrutural para suportar elevada carga mecânica e elétrica. A título de informação, sabe-se que o pino metálico de aço fixado no interior do vidro com cimento estrutural, depois de atingir a cura, pode suportar uma carga de tração superior a 80 kN ou mais.

A figura 15 mostra a foto de um isolador de vidro com a parte vítrea quebrada para auxiliar e facilitar a interpretação das imagens radiográficas obtida e processada mostradas nas figuras 15. Comparando as radiografias digitais de isoladores de vidro íntegro e quebrado, nota-se uma diferença na textura no interior do isolador quebrado, que atribuímos como sendo textura gerada pelas fraturas/trincas do vidro devido à têmpera. Esta textura de fratura torna-se mais evidente após aplicação dos filtros *emboss* e principalmente, o filtro LOG, mostradas nas figuras 15(c) e 15(d), respectivamente.

Para comprovar esta hipótese, o pino de aço foi cuidadosamente extraído do interior do isolador de vidro quebrado sem não danificar a parte vítrea após a realização dos ensaios de radiografia digital. A figura 16 mostra as fotos do interior do isolador de vidro quebrado após a retirada do cimento e pino metálico. Pelo fato do vidro ser temperado, concluiu-se que quando a saia de vidro é quebrada, as trincas propagam-se em toda extensão, inclusive, para interior do isolador. Portanto, embora a fissura seja de dimensão micrométrica, em função de um grande número de trincas, a textura observada na imagem de radiografia digital do isolador quebrado, evidenciada na figura 15(d) após o processamento é devido à textura de fratura do vidro.

Figura 16. Fotos do interior do isolador quebrado sem o pino de aço. A foto da esquerda mostra em mais detalhe os padrões de fratura.

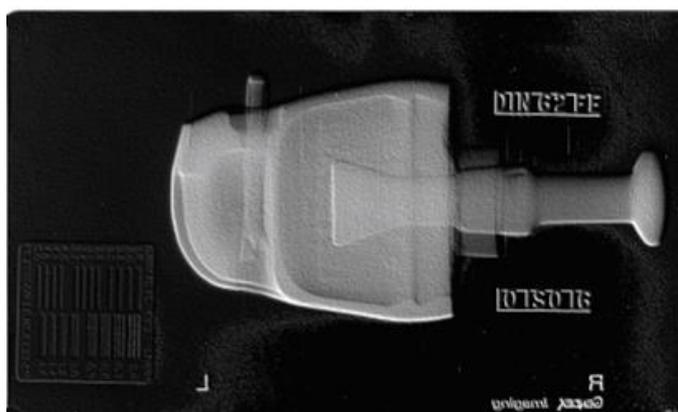


Fonte: O Autor

Assim, com o teste sobre a potencialidade aplicativa e resolução da tecnologia IP para o sistema de radiografia computadorizada, de que possui alta sensibilidade possibilitando obter imagens de alta qualidade mesmo utilizando uma fonte de baixíssima atividade, que não seria possível caso empregasse um filme de raios-X convencional fosse em função da necessidade de expor por um tempo extremamente longo. Ademais, do ponto de proteção radiológica torna-se bastante interessante devido à redução da área de balizamento e principalmente devido a exposição mínima dos operadores à radiação ionizantes. Outro fator interessante comprovada no presente ensaio de radiografia computadorizada é a possibilidade processar as imagens digitais utilizando diferentes tipos de filtros matemáticos, realçando detalhes, de modo a facilitar a interpretação.

A figura 17 mostra a imagem de radiografia digital do isolador quebrado após o processamento de imagem com o filtro *emboss*. No canto direito inferior, observa-se o indicador de qualidade de imagem (IQI), que indica resolução de definição de 1,8 linhas/mm.

Figura 17. Imagem radiográfica processada com o filtro “emboss”, mostrando o indicador de qualidade de imagem radiográfica (IQI) no lado direito inferior.



Fonte: O Autor

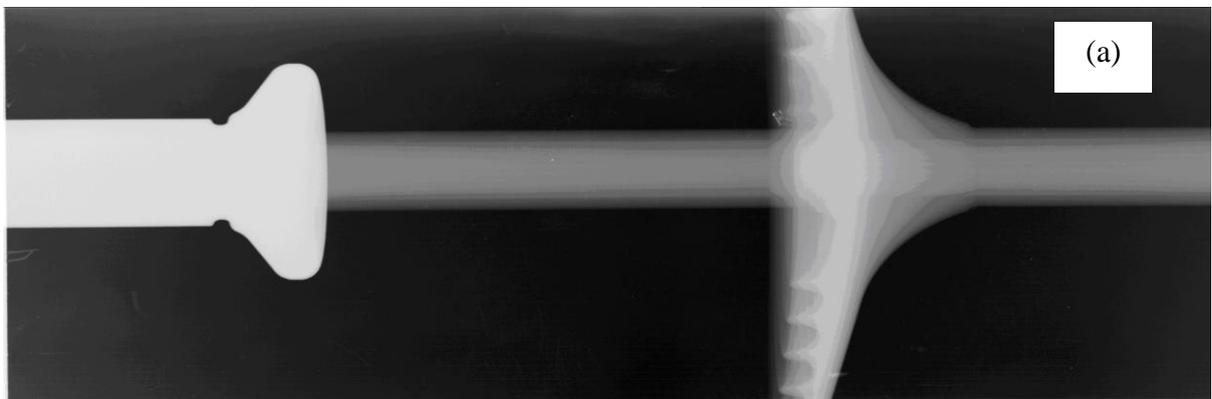
4.2. ISOLADORES DE COMPÓSITO – POLIMÉRICO

A utilização em grande escala dos isoladores de compósito nas linhas de transmissão iniciou-se a partir da década de 1960 em função de uma série de vantagens em relação aos isoladores de vidro e de porcelana por ser mais leves, possuir alta resistência mecânica à tração, facilidade e rapidez na instalação/substituição, entretanto, possui um problema que, eventualmente, o núcleo do isolador composto de resina reforçada com fibras de vidro pode fraturar levando o cabo ao chão. Os mecanismos atribuídos que levam a esta falha ainda não são bem conhecidos, mas é atribuído à fratura frágil causada por ataque químico sob tensão. A seguir, são mostradas as imagens radiográficas de um isolador de compósito que apresentam trincas/fissuras. A título de comparação, a radiografia da figura 18(a) mostra a imagem radiográfica de isolador de compósito sem trincas na parte do material polimérico que recobre e protege o núcleo de compósito que possui a função estrutural. As trincas são observadas na imagem radiográfica da figura 18(b). Sabe-se que as trincas iniciam-se a partir da superfície externa propagando-se para o interior, entretanto, a observação visual das trincas no campo é totalmente comprometida porque o isolador está coberto por um depósito de poeiras acumuladas ao longo de seu uso na linha de transmissão.

As fissuras das trincas detectadas por radiografia na figura 18(b) são essencialmente perpendiculares ao eixo principal do núcleo do compósito. As figura 20 e 21 mostram a imagem radiográfica da figura 18(b) processadas com filtros

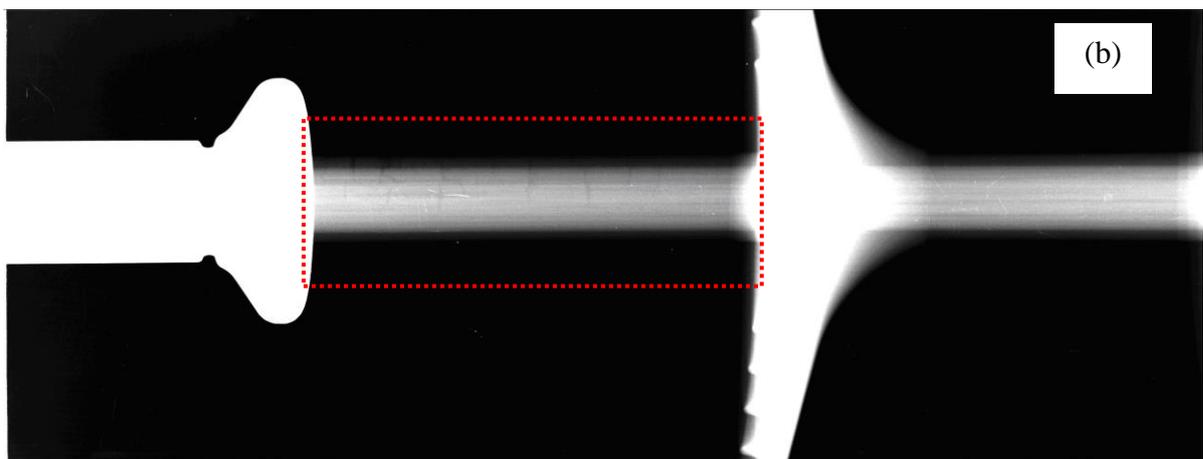
matemáticos *emboss* e LOG – Laplaciano e Gaussiano. Com a aplicação dos filtros, nota-se que as trincas ficam mais evidentes. Na prática, a presença de trincas na parte de revestimento polimérica é um fator de preocupação devido servir de porta de entrada de substâncias, principalmente de caráter ácido sintetizada na presença de campo elétrico intenso e afetar o material compósito causando a delaminação e como consequência, a fratura frágil. Ademais, observa-se também a textura devido às fibras.

Figura 18. Mostra as radiografias digitais dos isoladores de compósito sem trinca (a) no material polimérico.



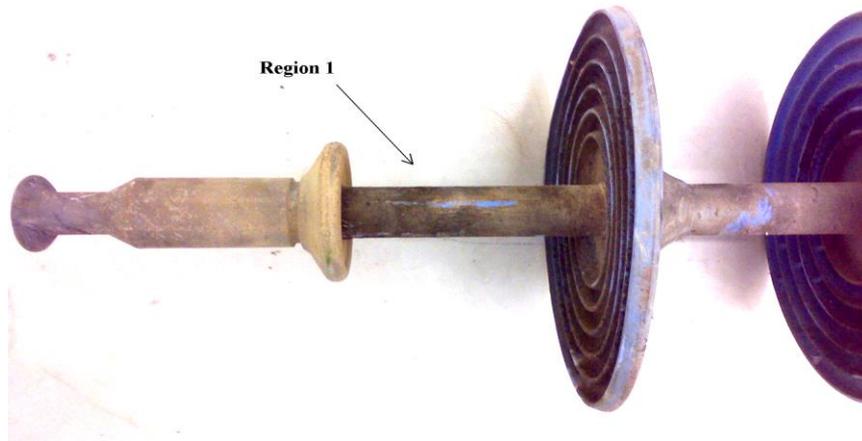
Fonte: O Autor

Figura 18. Mostra as radiografias digitais dos isoladores de compósito com trinca (b) no material polimérico.



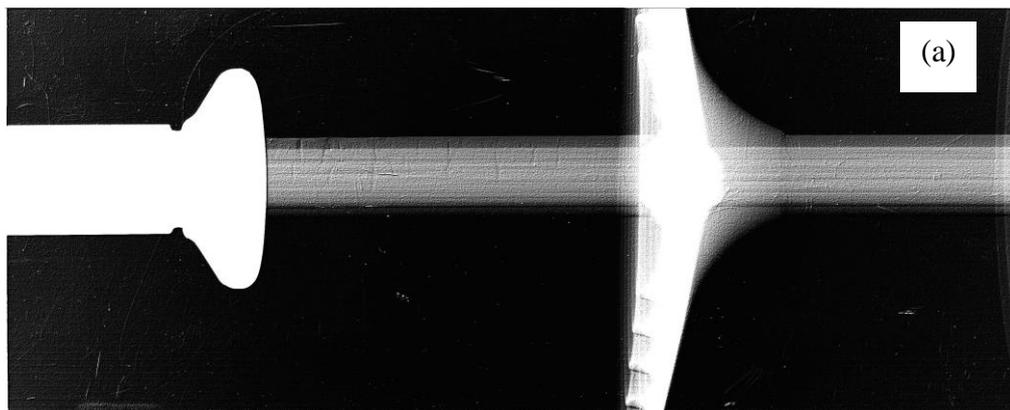
Fonte: O Autor

Figura 19. Foto do isolador de compósito mostrando estado de deposição de poeiras sobre a superfície do material polimérico que apresenta trincas/fissuras



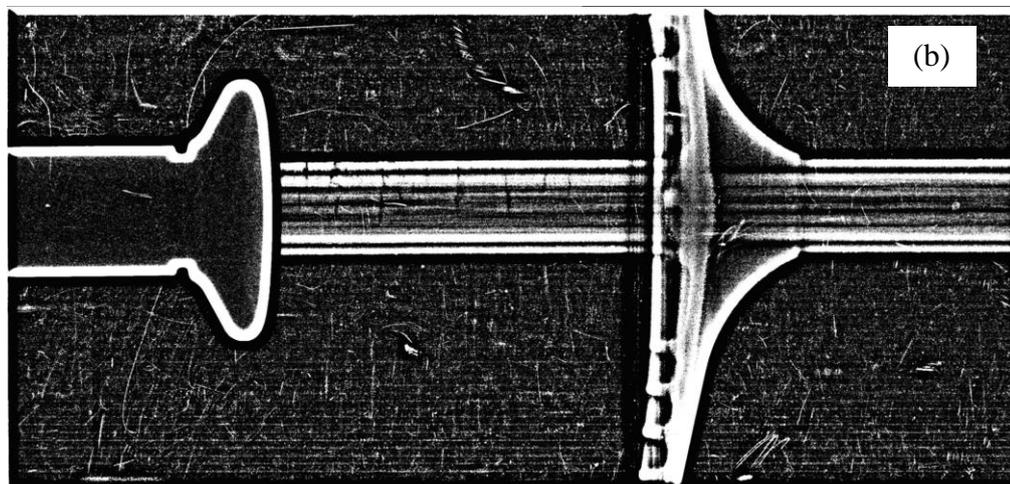
Fonte: O Autor

Figura 20. (a) Radiografia digital processada com o filtro *emboss*, mostrando com realce as trincas e textura das fibras.



Fonte: O Autor

Figura 21. (b) Radiografia digital processada com o filtro LOG mostrando com realce as trincas e textura das fibras.

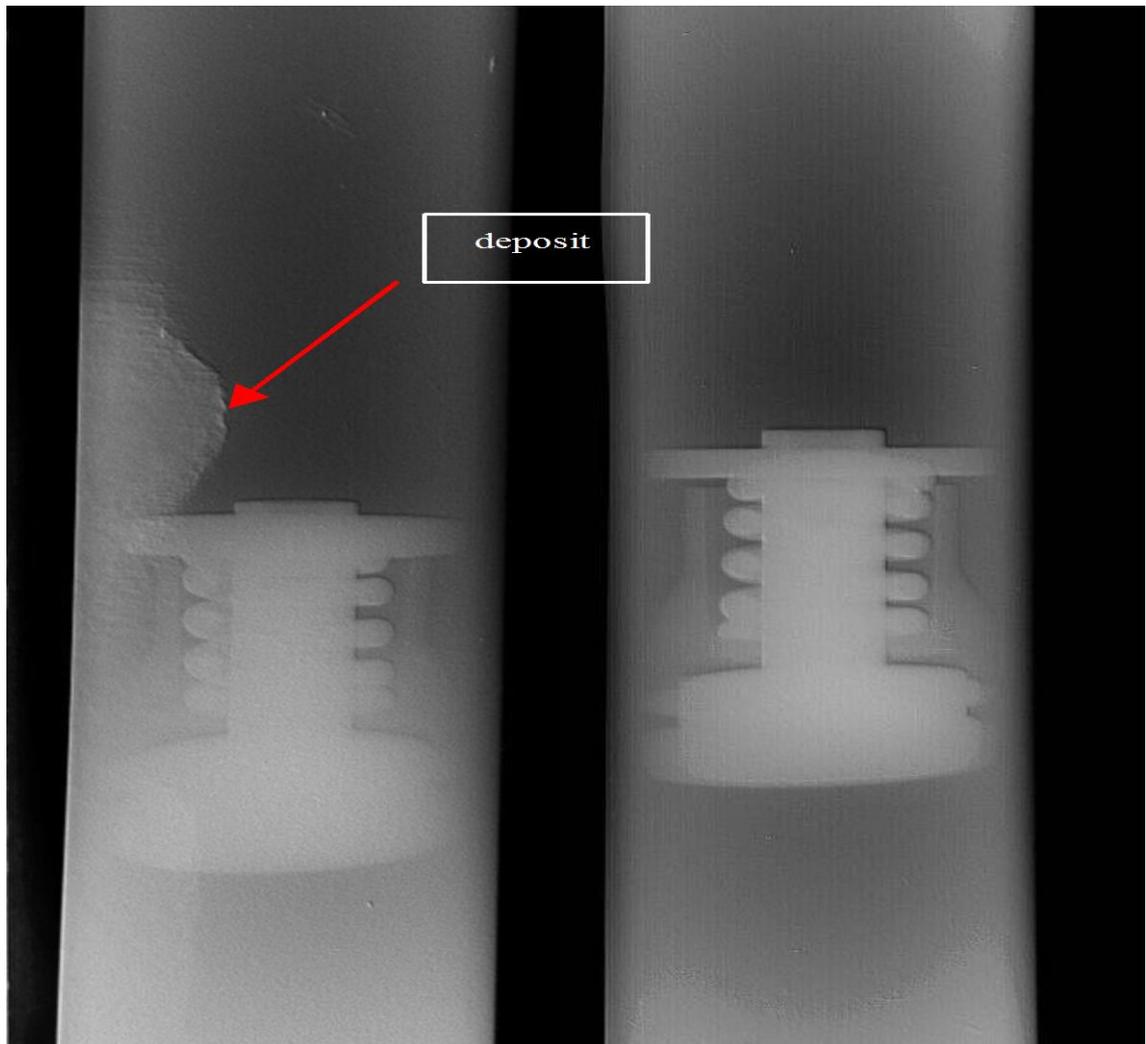


Fonte: O Autor

4.3. CILINDROS ACUMULADORES DO DISJUNTOR

A figura 22 mostra a imagem radiográfica pós o processamento com filtro *emboss* de dois cilindros acumuladores com êmbolos de acionamento hidráulico-pneumático de uma subestação dispostos em paralelo. A parte superior do êmbolo é preenchida com gás inerte sob alta pressão e a parte inferior com óleo. Funcionamento normal deste tipo de dispositivo é de que os êmbolos estejam sempre ocupando o mesmo nível.

Figura 22. Imagem radiográfica do disjuntor de subestação, processada com filtro “emboss” mostrando deposição de materiais na parede interna do cilindro, tornando difícil o movimento de um dos êmbolos.



Fonte: O Autor

De acordo com a radiografia obtida com o sistema de radiografia computadorizada, revelou claramente que algum tipo de material foi depositado na parede interna do cilindro tornando difícil o movimento adequado do êmbolo esquerdo. Portanto, observa-se que, sem a necessidade de abrir os cilindros e desligar o disjuntor de 230 kV é possível realizar o diagnóstico preciso do sistema de acionamento. A inspeção dos cilindros acumuladores com o sistema de radiografia computadorizada mostrou-se extremamente rápida e eficiente.

5. RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE CABO ENERGIZADO JUNTO AO GRAMPO DE SUSPENSÃO

5.1. PROCESSAMENTO DE IMAGEM DIGITAL DE CABOS CONDUTORES

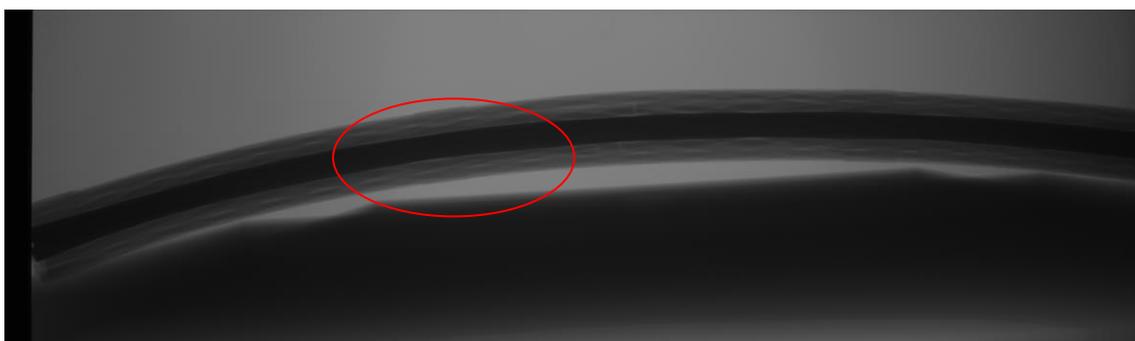
5.1.1. Cabo com falha simulada

Foi realizado um ensaio de radiografia digital em um cabo utilizado de linhas de alta tensão da Chesf, onde se simularam falhas ao longo do cabo para testar a eficiência do sistema de radiografia.

Neste ensaio, utilizou-se uma distância de 60 cm entre a fonte e a amostra e o tempo de exposição foi de 50 pulsos. Após os ensaios, as imagens foram processadas com a aplicação de diversos filtros que permitiram a visualização de diversas falhas que antes não podiam ser visualizadas facilmente.

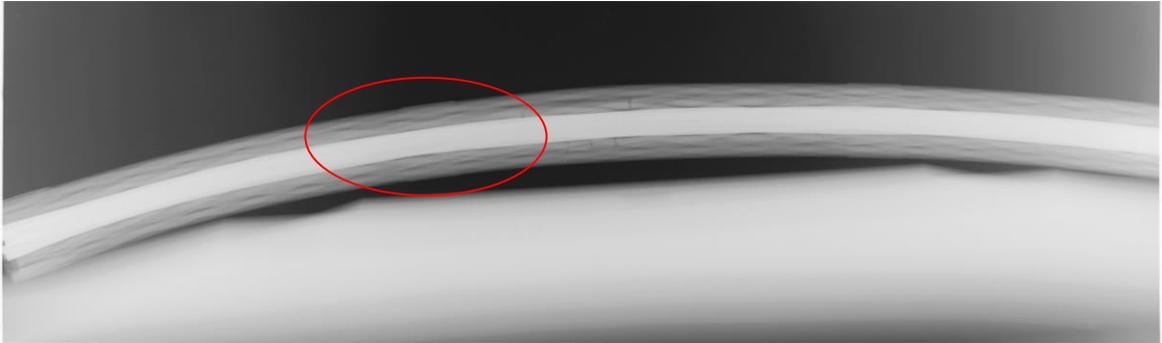
Cabo da Chesf utilizado para simular as falhas

Figura 23. Imagem original obtida da radiografia digital do cabo. Nesta figura percebemos que as falhas não são facilmente visualizadas.



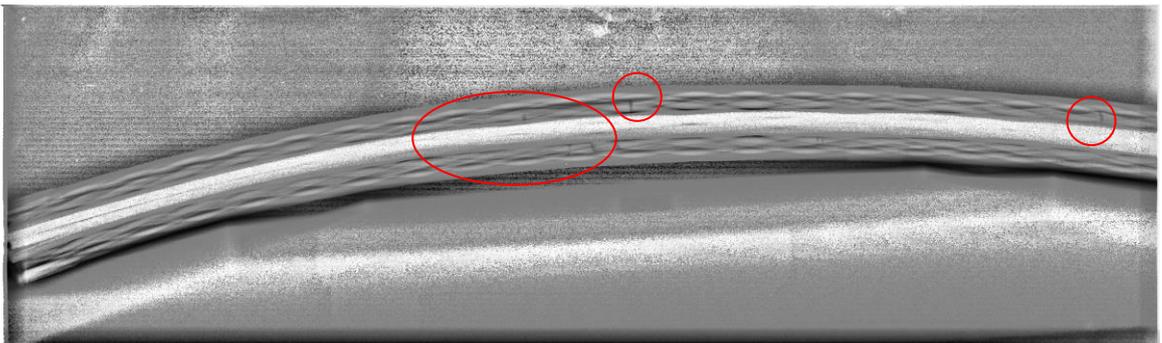
Fonte: O Autor

Figura 24. Após o processamento da imagem com a aplicação do filtro, obteve-se uma melhora na visualização das falhas do cabo.



Fonte: O Autor

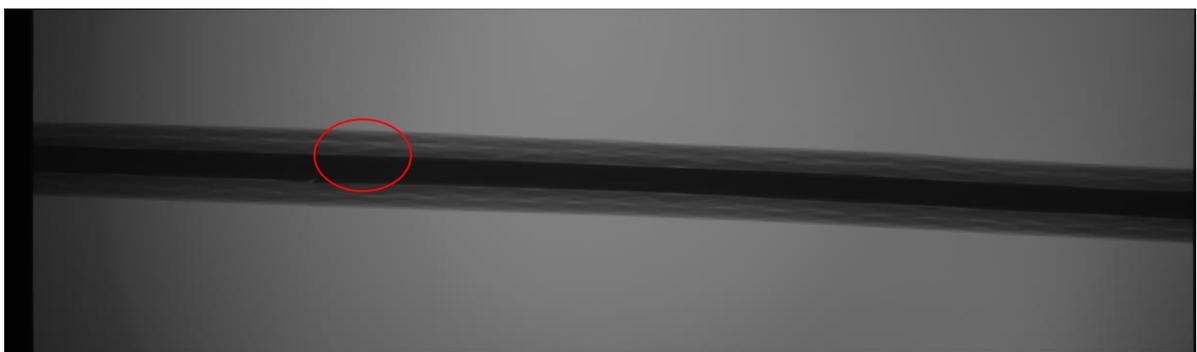
Figura 25. Com a aplicação do filtro, algumas falhas que não foram observadas anteriormente, agora podem ser visualizadas com clareza.



Fonte: O Autor

Outros ensaios também foram realizados com cabos. Neste caso, podemos visualizar com clareza a falha contida no interior do cabo, na alma de aço.

Figura 26. Imagem original obtida da radiografia digital do cabo. Nesta figura percebemos que a falha não é facilmente visualizada.



Fonte: O Autor

Figura 27. Após o processamento da imagem com a aplicação do filtro, obteve-se uma melhora na visualização da falha do cabo.



Fonte: O Autor

5.2. RADIOGRAFIA INDUSTRIAL DIGITAL DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DA CHESF

Este item apresenta resultados de radiografia digital de cabos com ferragens utilizados nas linhas de transmissão, realizados na UFPE. As imagens foram processadas posteriormente com diversos filtros, para se obter uma melhora na visualização dos detalhes da peça.

5.2.1. Cabos com ferragens para linhas de transmissão

Os cabos acompanhados de ferragens foram recebidos da Chesf de acordo com o relatório do mês 3 do P&D. Os experimentos foram realizados utilizando a sala do Departamento de engenharia nuclear da UFPE. As imagens foram obtidas utilizando-se uma fonte de raios-X compacta da Golden Engineering. As figuras abaixo mostram as fotos do cabo com a ferragem, bem como suas imagens radiografadas e processadas.

Figura 28. Imagens do experimento de um cabo condutor com a ferragem utilizando Imaging Plate e a fonte de raios-X da Goldeng Engineering XR-150 e do sistema IP, com leitura, apagamento e visualização de radiografia.



Fonte: O Autor

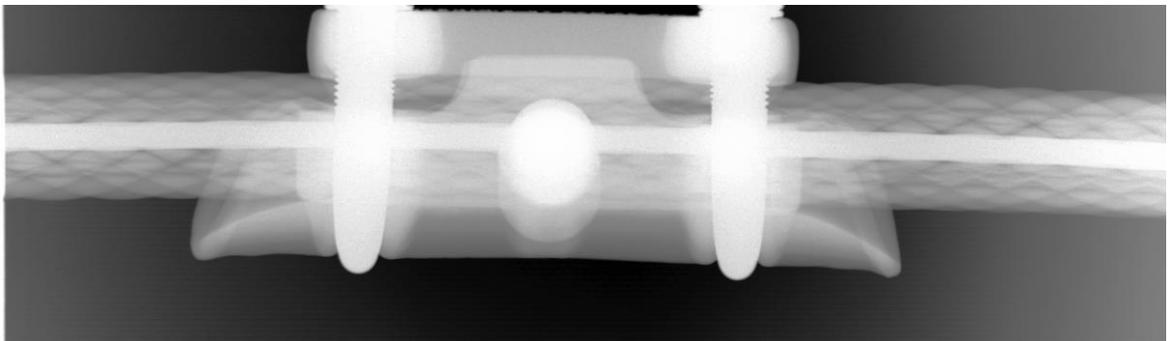
Figura 29. Cabo acoplado na ferragem em detalhe.



Fonte: O Autor

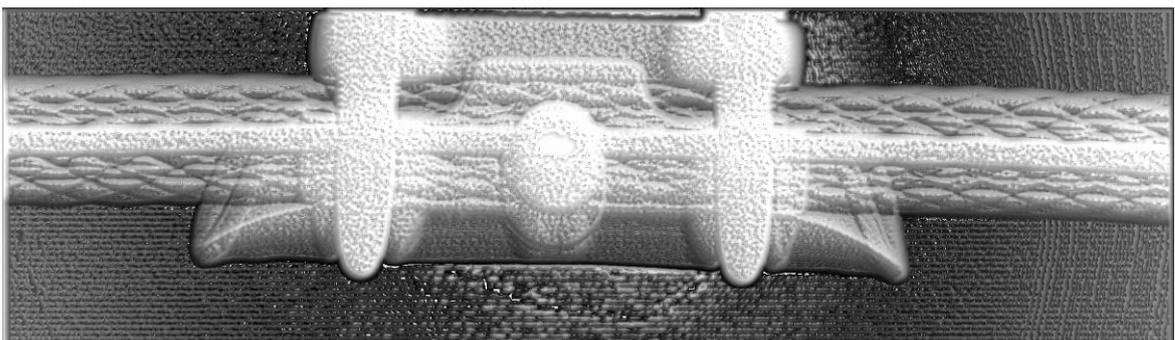
Figura 30. Imagem da radiografia digital do cabo acoplado na ferragem como foi obtida.

Tempo de exposição: 50 pulsos.



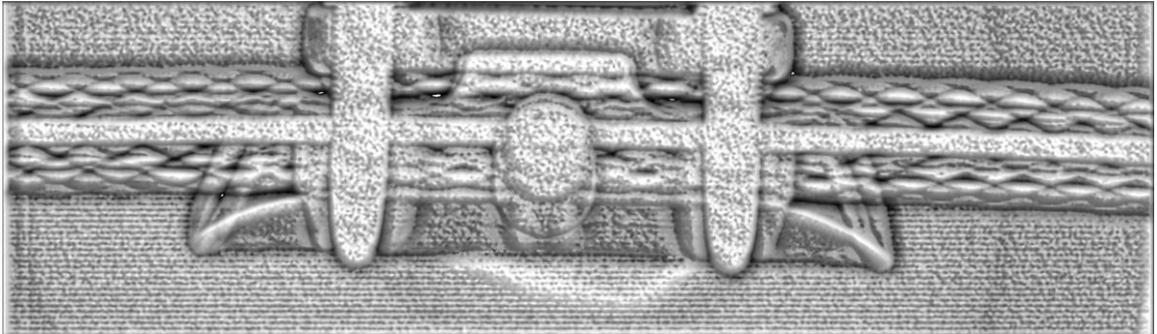
Fonte: O Autor

Figura 31. Imagem do cabo acoplado na ferragem processada com filtro.



Fonte: O Auto

Figura 32. Imagem do cabo acoplado na ferragem processada com filtro.



Fonte: O Autor

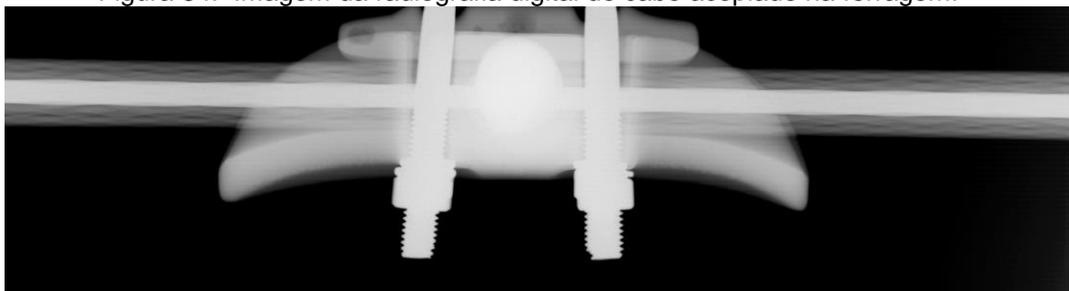
Além das imagens mostradas anteriormente, foi radiografado um segundo tipo de ferragem para linhas de transmissão. As imagens foram obtidas utilizando-se uma fonte de raios-X. As figuras abaixo mostram as fotos da ferragem, bem como suas imagens radiografadas e processadas.

Figura 33. Imagem da lateral do cabo acoplado na ferragem.



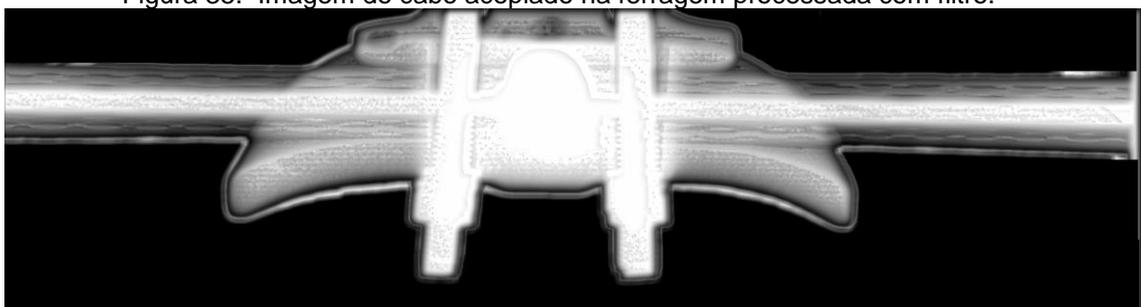
Fonte: O Autor

Figura 34. Imagem da radiografia digital do cabo acoplado na ferragem.



Fonte: O Autor

Figura 35. Imagem do cabo acoplado na ferragem processada com filtro.



Fonte: O Autor

5.3. TESTE INICIAL NO CAMPO DO SUPORTE ISOLANTE PARA FIXAÇÃO DO DETECTOR DIGITAL IP E UMA FONTE DE RAIOS-X COMPACTA PARA RADIOGRAFAR EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.

No mês de dezembro de 2005, entre os dias 05 a 07, foram realizados os primeiros experimentos com o dispositivo eletromecânico desenvolvido na UFPE para obter imagens de equipamentos em campo. Neste experimento foram utilizados:

- Fonte de Raios-X (XR150) portátil adquirida através de projeto P&D Chesf;
- Filme Imaging Plate de Super Resolução tipo SR;
- Leitor Cyclone da Perkin-Elmer (para o filme IP).
- Computador tipo desktop - PC com o Software OptiQuant para aquisição e tratamento das imagens;
- Suporte para instalação do Sistema Radiográfico em Linhas de Transmissão.

Os ensaios foram realizados em um cabo da linha de transmissão, e também em um isolador tipo pedestal retirado de uma subestação. Os resultados podem ser vistos a seguir.

5.3.1. Ensaio com linha de transmissão

O suporte com fonte de raios-X foi colocado na linha pelos eletricitistas de linha viva para aquisição das imagens radiográficas. Algumas imagens do experimento podem ser vistas a seguir:

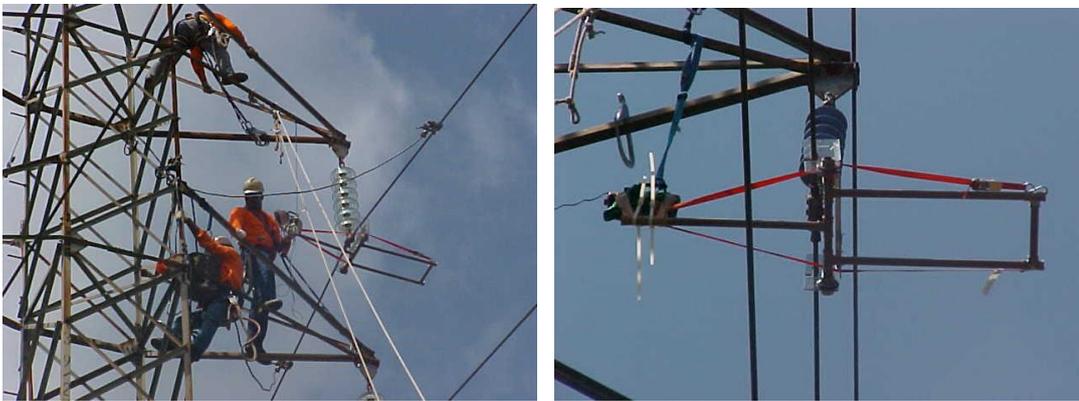
Figura 36. Imagens de equipamentos utilizados durante os ensaios em campo.





Fonte: O Autor

Figura 37. Imagens da colocação do dispositivo na linha e montagem final do experimento.



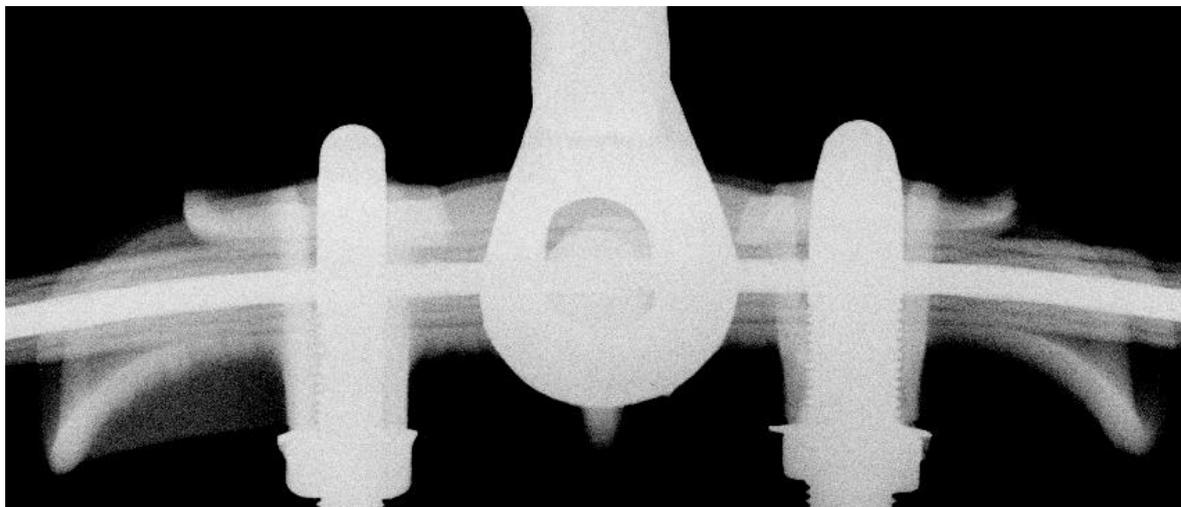
Fonte: O Autor

Figura 38. Imagem do cabo com a ferragem de linha de transmissão de 69 kV radiografada com sistema digital.



Fonte: O Autor

Figura 39. . Imagem obtida a partir da radiografia da ferragem.

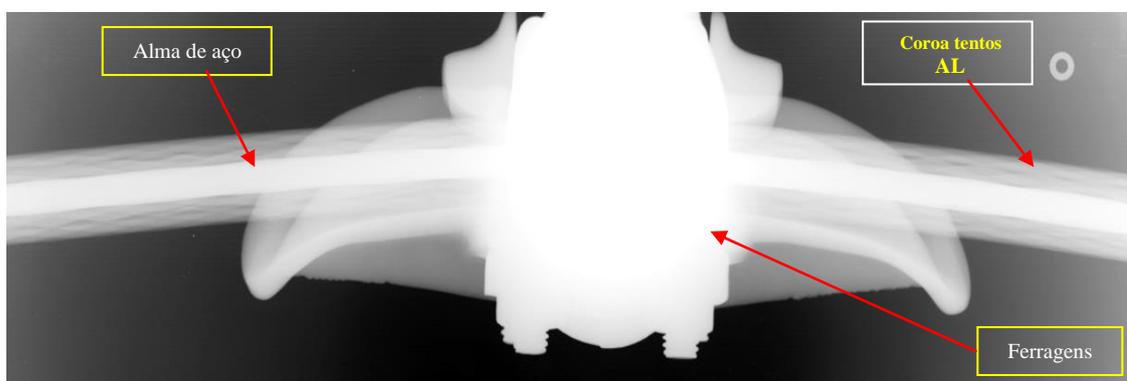


Fonte: O Autor

Os cabos aéreos das linhas de transmissão estão sujeitos à vibração e movimentos cíclicos devido as ações do vento, calor solar. Longo período de operação, essencialmente junto ao grampo de suspensão ocorre o encruamento devido à carga cíclica do cabo levando a fratura dos tentos que afeta propriedades elétricas e mecânicas. Portanto, a inspeção da integridade junto ao grampo de suspensão é de fundamental importância. Um exemplo de um cabo junto ao grampo de suspensão está mostrada na foto da figura 40. Do ponto construtivo, o cabo é constituído de alma de aço localizada na parte central, que tem a função de suportar mecanicamente o peso do cabo, e tentos de ligas de alumínio na parte externa.

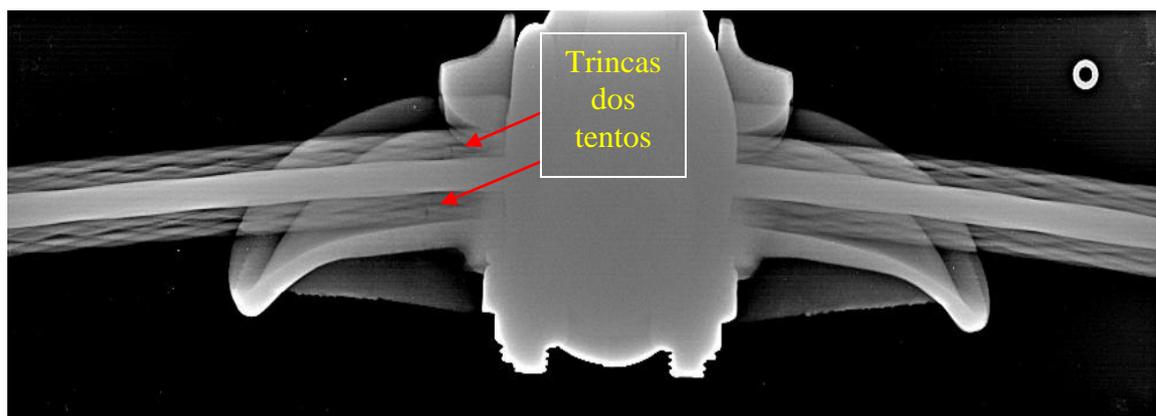
A figura 41 mostra uma **imagem radiográfica inédita** de um cabo elétrico energizado junto ao grampo de suspensão de uma linha de transmissão de 230 kV com mais de 30 anos de operação na região de Fortaleza-CE, a qual foi obtida com o sistema de radiografia computadorizada desenvolvido no projeto de pesquisa P&D com o tempo de exposição inferior a 30 segundos empregando o método à distância. A radiografia mostra claramente a estrutura do cabo: a alma de aço no interior do cabo, e detalhes das ferragens utilizadas na fixação e suspensão do cabo.

Figura 40. Imagem radiográfica, sem processamento, de cabo de linhas de transmissão, obtida com o sistema de radiografia computadorizada.



Fonte: O Autor

Figura 41. Imagem radiográfica após processamento da imagem digital mostrando a presença de trincas no cabo, no interior do grupo de suspensão, que não são possíveis de observar visualmente.



Fonte: O Autor

A figura 41 mostra a imagem radiográfica pós tratamento com a técnica de processamento de imagem digital. A imagem radiográfica é positiva, isto é, onde não houve atenuação de raios-X, aparece escuro. Na parte esquerda do grupo de suspensão, observou-se trincas dos tentos de AL, que revelados pelo contraste e indicado com as setas.

Através desta imagem radiográfica obtida com sucesso utilizando o sistema de radiografia computadorizada desenvolvido mostrou claramente a potencialidade de detectar trincas nos cabos energizados de forma rápida, seguro e com alta produtividade.

6. CONCLUSÕES

Imagens radiográficas de excelente qualidade do cabo energizado junto ao grampo de suspensão de linha de transmissão foram obtidas no campo utilizando o sistema de radiografia computadorizada inovativo, de baixo custo, alto desempenho, o qual foi desenvolvido no presente projeto de pesquisa de P&D para aplicação pioneira no setor elétrico. Ademais, o processamento de imagens digitais utilizando filtros, possibilitou-nos a realçar e discernir detalhes nas imagens radiográficas originais, possibilitando diagnósticos precisos do cabo. O sistema de radiografia computadorizada foi aplicado com sucesso para inspeção de vários dispositivos aqui apresentados.

Devido alta sensibilidade do sistema de radiografia computadorizada, o presente sistema é também bastante interessante do ponto de vista de proteção radiológica reduzindo o espaço de balizamento e principalmente reduzindo a exposição dos operadores à radiação.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL–Agência Nacional de Energia Elétrica, Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 09 ago.2007.
- [2] EWERT, U. “**New Trends in Industrial Radiography**”, NDT.net, vol. 7, n. 2, pp. 1-5, fev. 2002.
- [3] DAVIS, A. W.; BERRY, P. C.; CLAYTOR, T. N.; FRY, D. A.; JONES, M. H.; WHITE, S. M. “**An Analysis of Industrial Nondestructive Testing Employing Digital Radiography as an Alternative to Film Radiography**”, LA-UR-00-2560, 2000.
- [4] LAVAYSSIÈRE, B.; BONIN, A.; GAUTIER, S.; FRANCE, C. “**New Development in Industrial Radiography at EDF**”, in Proc. of DGfP, Berlin, pp. 115-121, 1999.
- [5] ONEL, Y.; EWERT, U.; WILLEMS, P. “**Radiographic Wall Thickness Measurement of Pipes by a New Tomographic Algorithm**”, in Proc. of 15th WCNDT, Roma, pp. 1-6, 2000.
- [6] ZSCHEREL, U.; ONEL, Y.; EWERT, U. “**New Concepts for Corrosion Inspection of Pipelines by Digital Industrial Radiology (DIR)**”, in Proc. of 15th WCNDT, Roma, pp. 1-10, 2000.
- [7] FILHO, S.B. “**Simulação de um Ensaio de Fadiga por Fretting Empregando o Método dos Elementos Finitos**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Univ. Federal Fluminense, 2003.
- [8] Radiographic Inspection. **Formula Based on Newton`s Inverse Square Law**. *NDT Resource Center*. Disponível em: <<https://www.ndeed.org/GeneralResources/Formulas/RTFormula/InverseSquare/InverseSquareLaw.htm>>. Acesso em: 20 jan.2010.
- [9] HIJAZI, L . A . ALA . Radiography Testing , **Introduction to Non-Destructive Testing Techniques**. Disponível em: <[https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Radiographic Testing](https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Radiographic%20Testing)>. Acesso em 20 ago.2010.
- [10] HALMSHAW. R. “**Industrial Radiology – Theory and Practice**”, Non destructive Evaluation – series, Second edition, Chapman&Hall, 1995.
- [11] AMEMIYA, Y. “**Aplicações de métodos de Difração de raios-X. Parte II: Novas técnicas de Medição – Imaging Plate**”, Seminário, pp. 59-68, 1993.
- [12] Fuji Photo Film Co Ltd., Tokyo. Disponível em: <<http://www.fujifilm.com>>. Acesso em: 09 ago.2007.
- [13] EXTENDE CIVA, França. Disponível em: <<http://www.extende.com>>. Acesso em: 20 ago. 2007.

- [14] DAVIS, A. W.; BERRY, P. C.; CLAYTOR, T. N.; FRY, D. A.; JONES, M. H. AND WHITE, S. M. **“An Analysis of Industrial Nondestructive Testing Employing Digital Radiography as an Alternative to Film Radiography”**, LA-UR-00-2560, 2000.
- [15] JAGANNATHAN, H.; BHASKAR, N. P.; SRIRAMAN, P. C. N.; VIJAY, N. A. **“Step Towards Automatic Defect Pattern Analysis and Evaluation in Industrial Radiography Using Digital Image Processing”**, in Proc. of 15th WCNDT, Roma, pp. 1-5, 2000.
- [16] CHEN, R. AND LOCKWOOD, D.J. **“Developments in luminescence and display materials over the last 100 years as reflected in electrochemical society publications”**, *J. Electrochem. Soc.*, 149 (9) pp. S69-S78, 2002.
- [17] RONDA, C. **“Luminescence: From Theory to Applications”**, Wiley-VCH, 2007.
- [18] BLETTNER, A.; CHAUVEAU, D.; GRESSET, F. **“Results of the First Industrial Applications of the New Generation of Imaging Plates”**, in Proc. of 15th WCNDT, Roma, pp. 1-6, 2000.
- [19] ASTM E2007-10. *ASTM Standard Guide for Computed Radiography*, 2010.
- [20] CNEN-NE3.01. **Diretrizes de Radioproteção Radiológica**. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2010.
- [21] CIGRE TF 2 WG 11 SC 22. **Guide to Vibration Measurements on Overhead Lines**. ELECTRA nº 162, October 1995.
- [22] IEEE COMMITTEE REPORT. **Standardization of conductor vibration measurements**. IEEE PAS vol. 85 Nº. 1, 1966.
- [23] CIGRE WG 04 SC 22 – 02. **Recommendations for the evaluation of the lifetime of transmission line conductors**. ELECTRA 63, March 1979.
- [24] EPRI Transmission line reference book. **Wind induced conductor motion** - Research project 792 – 1979, Orange Book (Update1002016), October 2004.
- [25] CIGRE WG 22-04. **Guide for endurance tests of conductors inside clamps**. ELECTRA nº 100, May 1985.

APÊNDICE A – TRABALHOS PUBLICADOS

APRESENTAÇÕES EM CONGRESSOS INTERNACIONAIS.

- 1- ARMANDO .H. SHINOHARA, LUIZA. R. P. LEITE, JULIANA. A.YANAGUIZAWA, OTÁVIO. H. MAGALHÃES, HELEN. J. KHOURY, FLÁVIO M. A. C. BRANCO, JOSÉ. F. A. G. WAVRIK , MARCO. A. LEITE, TEREZA. C. GALINDO. **Radiografia Computadorizada de Alta Definição Para Avaliação dos Isoladores de Vidro Empregados em Linhas de Transmissão**, 6th Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission, *VI CLAGTEE* , *Mar Del Plata, Argentina, 2005.*
- 2- ARMANDO. H. SHINOHARA, DANILO. M. F. SANTANA, PIETRO. P. J. C. OLIVEIRA, RODRIGO. J. G. SILVA, OTÁVIO. H. MAGALHÃES, CIDRACK. G. SILVEIRA, HELEN. J. KHOURY, JOSÉ F. A. G. WAVRIK, FLÁVIO. M. A. C. BRANCO, MARCO. A. LEITE, TEREZA. C. GALINDO. **Defects Detection in Electrical Insulators and Breaker for High Voltage by Low Cost Computed Radiography Systems**, Internacional Symposium on Digital industrial radiology and Computed tomography, Lyon, France. DIR, 2007.
- 3- J. F. A. G. WAVRIK, A. S. SHINOHARA, F. M. A. C. BRANCO, D. M. F. SANTANA. **Radiografia Digital Aplicada para Avaliar a Integridade dos Materiais de Linhas de Transmissão**. Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-Americano da CIGRÉ, Foz do Iguaçu,Br, XII Eriac, 2007.
- 4- A. H. SHINOHARA, P. P. J. C. SILVA, Z. P. CASTRO JR., J. F. A. G. WAVRIK, M. L. PORTO, N. V. LACERDA. **Computed vs. Conventional Radiography for Detecting Cracks in Silicone Rubber Housing of In-Service Aged Composite Insulators**. 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing. Yokohama , Japao. 2391- APCNDT, 2009.

APÊNDICE B – TRABALHOS PREMIADOS

APRESENTAÇÃO EM CONGRESSOS NACIONAL E INTERNACIONAL.

- 1- ARMANDO .H. SHINOHARA, D. M. F. SANTANA, R. J. G. SILVA, O. H. MAGALHÃES, L. R. P. LEITE, J. A. YANAGUIZAWA, OTÁVIO. H. MAGALHÃES, H. J. KHOURY, JOSE F. A. G. WAVRIK , F. M. A. C. BRANCO, M. A. L. PORTO, T. C. L. GALINDO. **Aplicação de Radiografia Digital como Técnica Preditiva para Diagnóstico dos Equipamentos de Linhas de Transmissão e Subestações**, IV Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Araxá, Minas Gerais, Br, IV Citenel,2007. (Premio 3º lugar geral).

- 2- J. F. A. G. WAVRIK, A. S. SHINOHARA, F. M. A. C. BRANCO, D. M. F. SANTANA. **Radiografia Digital Aplicada para Avaliar a Integridade dos Materiais de Linhas de Transmissão**. Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-Americano da CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Br, XII Eriac,2007.(Premio 3º lugar geral).