


AVALIAÇÃO DAS FERRAGENS DE AÇO COM CORROSÃO NA TORRE DE CONCRETO ARMADO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE 500 kV POR RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE ALTA ENERGIA: AVALIAÇÃO LABORATORIAL

 <https://doi.org/10.56238/arev7n5-304>

Data de submissão: 20/04/2025

Data de publicação: 20/05/2025

José Felipe André Gomes Wavrik

Mestre em Engenharia Mecânica
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: felipe.wavrik@ufpe.br

Armando Hideki Shinohara

Doutor em Engenharia
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: armando.shinohara@ufpe.br

Gustavo José Vasconcelos Xavier

Engenheiro Eletricista (Aposentado)
ELETROBRÁS/CHESF
E-mail: gustavojosevasconcelosxavier@gmail.com

Hissae Fujiwara

Graduação em Terapia Ocupacional
UFPE— Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: emailufpe@gmail.com

Paulo de Araújo Regis

Doutor em Engenharia Civil
UFPE- – Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: paulo.regis@ufpe.br

Delson Torikai

Doutor em Engenharia Mecânica
USP - Universidade de São Paulo
E-mail: delsontorikai@usp.br

Kleber Gonçalves Bezerra Alves

Doutor em Ciências de Materiais
UFPE— Universidade Federal de Pernambuco
E-mail: kleber.gbalves@ufpe.br

RESUMO

Monitorar e inspecionar a integridade das ferragens de aço dentro das torres de concreto armado das linhas de transmissão de extra-alta tensão de 500 kV de forma rápida e sem necessidade de desmontagem é essencial para a operação confiável do sistema elétrico. A inspeção das ferragens de aço apresenta alta complexidade devido à carga mecânica elevada causada pelo peso dos cabos condutores energizados. Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), a radiografia

é a técnica mais confiável entre as inspeções não destrutivas em concreto armado. No entanto, o maior desafio é obter imagens radiográficas de qualidade das ferragens de aço devido à dimensão da estrutura da torre de concreto armado, sua elevada altura e a condição energizada da linha de transmissão. Neste estudo, um segmento de concreto armado da torre, com seção transversal de 200 mm x 200 mm, foi reproduzido em laboratório, similar à da torre de concreto armado da linha de transmissão de extra-alta tensão de 500 kV encontrada no campo. As ferragens de aço com danos de corrosão no interior do segmento foram radiografadas utilizando raios-X de alta energia de 5 MeV gerado por betatron. Para compensar a relativa baixa taxa de dose dos raios-X gerados e emitidos pelo betatron, foi utilizado um detector de imagem radiográfica de alta sensibilidade denominado Imagem Plate (IP) de alta resolução espacial. Como resultado, uma imagem radiográfica de qualidade das ferragens de aço com danos de corrosão no interior do concreto armado foi obtida, especialmente após o processamento digital da imagem radiográfica utilizando um software dedicado para processamento de imagem radiográfica industrial digital.

Palavras-chave: Monitoramento e inspeção da integridade estrutural. Ferragem estrutural de aço com corrosão. Torre de concreto armado. Linhas de transmissão extra-alta tensão de 500 kV. Radiografia computadorizada de alta energia. Betatron.

1 INTRODUÇÃO

As torres de concreto armado são amplamente utilizadas em linhas de transmissão de alta tensão e extra-alta tensão de 500 kV (LABEGALINI *et al.*, 2005). Elas são fabricadas sob rígido controle de qualidade, transportadas e montadas no local. Ferragens de aço especiais são usadas para dar rigidez à estrutura e suportar as cadeias de isoladores com cabos condutores, cujo peso pode ultrapassar 9 toneladas. No entanto, ao longo do tempo, essas ferragens podem sofrer corrosão ou fusão devido à queda de raios e ocorrência de descargas elétricas, o que pode levar à ruptura das ferragens e levar os cabos condutores ao chão, interrompendo em definitivo a transmissão de energia elétrica e deixar a linha de transmissão indisponível. Para mitigar a indisponibilidade de transmissão, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) instituiu no Brasil a regra da Parcela Variável por Indisponibilidade (PVI). Esta regra consiste no desconto na remuneração mensal das concessionárias de transmissoras em razão da indisponibilidade verificada na instalação de transmissão (ANEEL, 2025). Assim, para as concessionárias manterem o sistema de transmissão de energia elétrica disponível para que o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) possa realizar o chaveamento de energia elétrica quando necessário, a realização periódica da inspeção não destrutiva para o monitoramento da integridade estrutural dos componentes da linha de transmissão é de fundamental importância. No Brasil, há décadas, o monitoramento e inspeção da integridade estrutural dos componentes das linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão e extra-alta tensão são conduzidas utilizando técnicas de inspeção visual, através de câmera infravermelha, e espelho retrovisor (GARCIA *et al.*, 1998; NERI, 2005). Porém, atualmente, as informações detalhadas sobre o estado das ferragens de aço no interior da estrutura de concreto armado não podem ser verificadas facilmente sem realizar a desmontagem, que demanda operações cuidadosas e tempo da equipe de linha energizada.

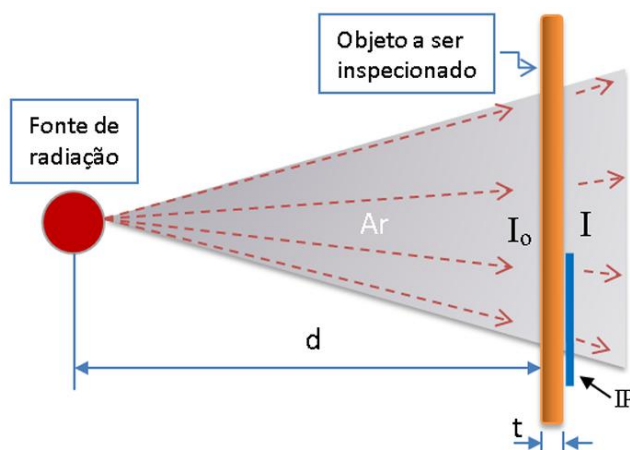
De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), o concreto armado pode ser monitorado e inspecionado de forma não destrutiva através de várias técnicas, como radar de penetração, ultrassom, martelo de rebote (IAEA, 2002). Especificamente para inspecionar as ferragens estruturais de aço no interior do concreto armado, a técnica de radiografia é considerada a mais confiável; entretanto, para concreto armado com espessuras superior a 200 mm requer o uso de raios-X de alta energia, isto é, acima de 1 MeV. (REDMER *et al.*, 2003; ANTON and HERMANKOVA, 2009; KELLER and PESSIKI, 2015). Realizar a inspeção de forma rápida, precisa, confiável e segura é de fundamental importância. Isso é essencial para inspecionar a integridade estrutural das ferragens de aço no interior das estruturas de concreto de grande dimensão sob alta tensão mecânica em linhas de transmissão de energia de tensão extra-alta de 500 kV, sendo de grande interesse para empresas concessionárias.

No presente estudo, um sistema radiográfico de alta energia utilizando o Imaging Plate como detector foi testado com o objetivo de avaliar o estado das ferragens de aço, que sofreram corrosão, no interior do concreto armado de dimensão similar à das torres de linha de transmissão de extra-alta tensão de 500 kV encontradas em campo. O segmento da torre de concreto armado foi reproduzido no laboratório, e as ferragens com danos de corrosão no seu interior foram radiografadas, processadas e analisadas.

2 FUNDAMENTOS DE INSPEÇÃO NÃO DESTRUTIVA POR RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE ALTA ENERGIA

Para realizar a inspeção de um objeto por radiografia, utiliza-se radiação ionizante, como raios-X ou raios- γ , e um detector para registrar defeitos ou falhas internas. O objeto é posicionado entre a fonte de radiação e o detector, preferencialmente próximo ao detector para reduzir o efeito geométrico da penumbra. Esse princípio foi estabelecido em 1895 com a descoberta dos raios-X, e a primeira imagem radiográfica foi publicada em 1896 pelo físico Wilhelm Conrad Röntgen, na Alemanha. Esse método radiográfico também é conhecido como método de absorção.

Figura 1. Arranjo radiográfico pelo método de absorção. O objeto sob a inspeção é posicionado entre uma fonte de radiação ionizante e um detector de imagem radiográfica, especificamente junto ao objeto para reduzir ao máximo o efeito geométrico de penumbra.



A radiação ionizante dos raios-X são ondas eletromagnéticas com comprimento de onda muito menor que a de luz visível, na ordem de angstrom (\AA). Elas podem atravessar corpos opacos e interagir com elétrons, ionizando átomos de gases, líquidos e sólidos. Sua capacidade de penetração depende do comprimento de onda, do número atômico " Z " e da densidade do material " ρ ". Segundo a teoria quântica de Planck, a energia dos fótons " E " é dada pela Equação 1.

$$E \text{ (keV)} = hc/\lambda \text{ (Å)} \quad (1)$$

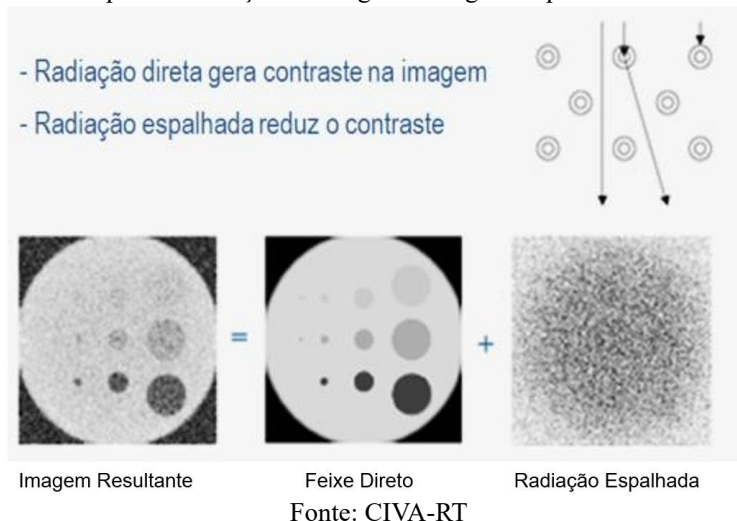
Onde " h " é a constante de Planck e " c " é a velocidade da luz. Na prática, quanto menor o comprimento de onda do raios-X, maior será a energia, e consequentemente, maior poder de penetração.

Na radiografia por absorção, como mostrado na figura 2, a imagem interna do objeto é formada por dois efeitos principais. Primeiro, os raios-X incidentes são absorvidos pelo material conforme a equação 2, dependendo do comprimento de onda dos raios-X e da espessura, densidade e número atômico do material. A relação entre as intensidades de radiação absorvida (I) e incidente (I_0) é dada pela Equação (2):

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2)$$

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

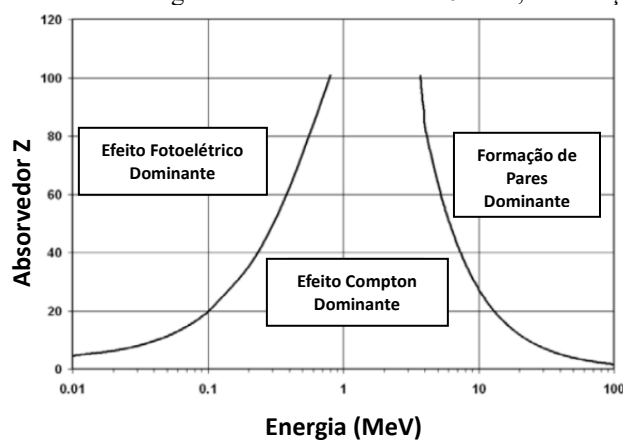
Figura 2. Princípio de formação de imagem radiográfica pelo método de absorção.



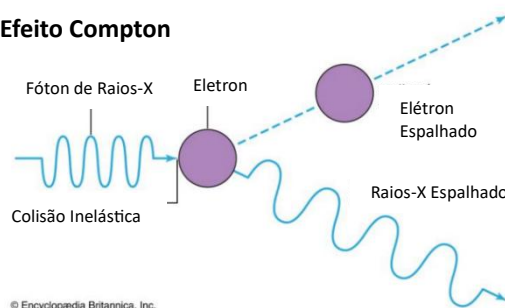
Como ilustrado na figura 2, o segundo efeito é a ocorrência do espalhamento de raios-X resultante da interação do raios-X com a matéria ao atravessar o objeto. O espalhamento de raios-X ao passar pelo objeto sob a inspeção não carrega informações de interesse, portanto, é considerado uma radiação indesejada na radiografia. Para obter imagem radiográfica de alta qualidade, reduzir ao máximo o espalhamento de raios-X é de fundamental importância. Para auxiliar na mitigação do espalhamento de raios-X resultante da interação do raios-X com a matéria, simulação numérica pode ser realizada pelo método de Monte Carlo (KELLER and PESSIKI, 2015). Além disso, sabe-se que

o controle de espalhamento de raios-X de alta energia devido ao efeito Compton no concreto é um desafio na obtenção de imagens radiográficas de alta qualidade com alta resolução espacial (HALMSHAW, 1995). Atualmente, para inspecionar a integridade estrutural do concreto armado por radiografia, existem basicamente três fontes de radiação ionizante no mercado: raios- γ de radioisótopo cobalto-60, raios-X de alta energia de acelerador linear (LINAC) e Betatron (REDMER *et al.*, 2003). Especificamente, o betatron pode produzir radiografias de alto contraste, sensibilidade e resolução, proporcionando um substituto ideal para isótopos, como o cobalto-60, que são caros e não podem fornecer radiografia de alta qualidade. O betatron portátil e comercial (JME, 2010) é um acelerador de elétrons, compacto e circular, que produz um feixe de raios-X de alta energia direcional. O material alvo do betatron pulsado de 200 Hz é feito de tântalo de 0,6 mm de espessura. Para acelerar os elétrons entre as energias de raios-X de 2 MeV e 7,5 MeV, a fonte de betatron usa um tubo de vácuo de vidro em forma de “donut”, que fica ensanduichado entre os eletroímãs (JME, 2010; RYCHKOV, KAPLIN, and SMOLYANSKIY, 2024).

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

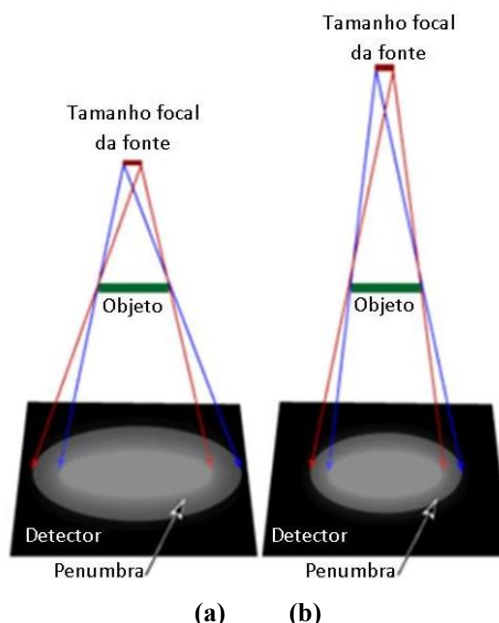


Efeito Compton



Fonte: BRITANNICA

Figura 4. Efeito geométrico de penumbra devido à dimensão da fonte de radiação, “focal spot”, em inglês. Esquema para redução do efeito geométrica de penumbra alterando a distância da fonte de radiação ao objeto sob inspeção.

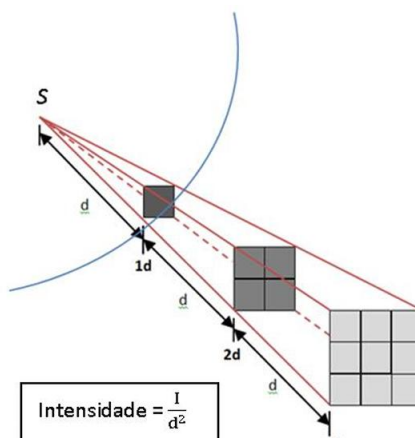


Fonte: IOWA STATE UNIVERSITY

Quando a radiação ionizante é gerada por uma fonte, ela se propaga no ar de uma forma cônica e a sua intensidade por área diminui de acordo com a lei da distância inversa de Newton, dada pela Equação 3; isto é, a intensidade diminui com o quadrado da distância, como mostra a Figura 5.

$$I_1 \times d_1^2 = I_2 \times d_2^2 \quad (3)$$

Figura 5. Mostra a lei de Newton sobre a diminuição da intensidade da radiação com o quadrado da distância. “S” é a intensidade de radiação na origem da fonte.



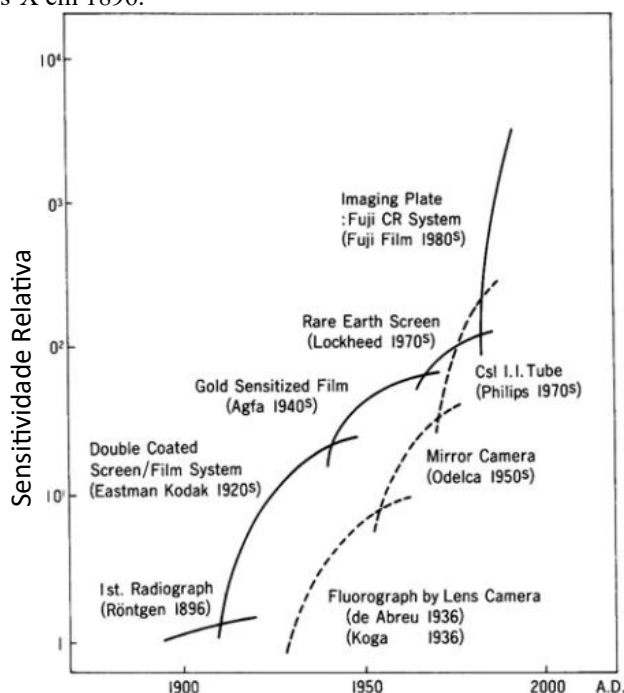
Fonte: IOWA STATE UNIVERSITY

Com respeito aos detectores de radiação ionizante, há basicamente dois tipos de detectores. Os chamados medidores de pulso, como o contador de cintilação e o contador proporcional, que medem os fótons um a um, são altamente sensíveis, mas um tempo morto da ordem de 1 ms. O segundo tipo

de detector é o chamado detector integral, como os filmes de raios-X e a câmara de ionização, que fornecem o total de fótons coletados durante a exposição à radiação ionizante. Diferentemente dos detectores de pulso e proporcionais, os detectores integrais não têm o problema do tempo morto, mas geram relativamente mais ruído, reduzindo a relação sinal/ruído - S/N do detector.

Na década de 1980, inicialmente visando uma aplicação médica, a FujiFilm do Japão desenvolveu um detector bidimensional inovador para radiografia, chamado de Imaging Plate (IP), explorando o fenômeno de luminescência de cristal (BaFBr:Eu^{2+}) através de luminescência estimulada opticamente – OSL (TATENO, IINUMA and TAKANO, 1987), como mostrado na figura 6.

Figura 6. Aumento de 2 a 3 ordem de grandeza na sensibilidade do detector Imaging Plate em relação filme de raios-X desde a primeira publicação do raios-X em 1896.

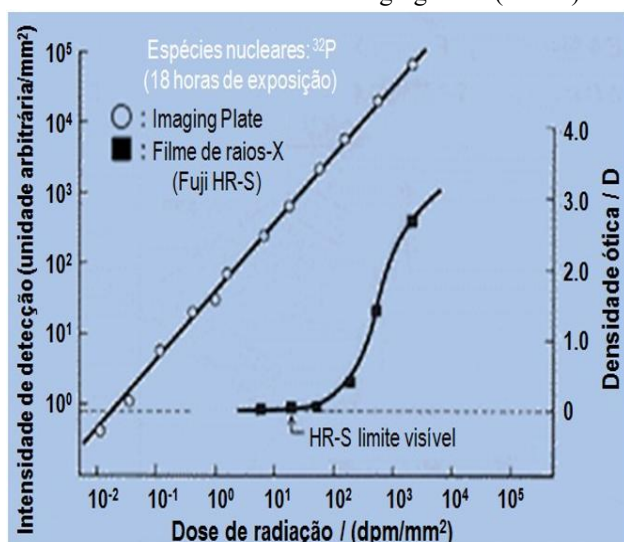


Fonte: TATENO, IINUMA AND TAKANO, 1987

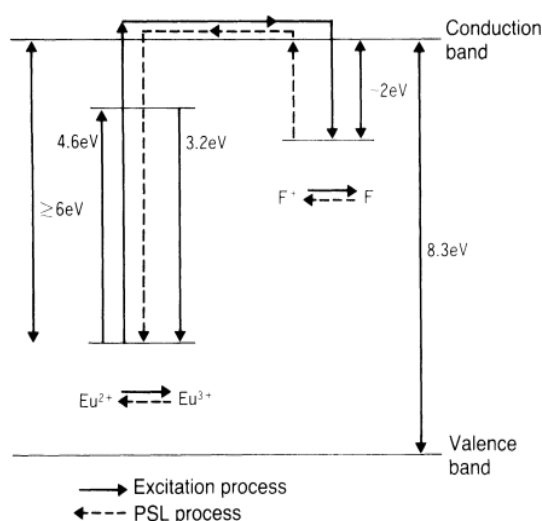
O detector IP reúne recursos de detectores integrais e de pulso. Em 1985, para uso em ciência dos materiais, as características do IP foram investigadas como detector de raios-X em técnicas de difração de raios-X para o estudo de estruturas cristalinas de materiais biológicos - que apresentam naturalmente baixa intensidade de difração, espalhamento de raios-X com radiação síncrotron (AMEMIYA and MIYAHARA, 1988). O estudo revelou também as seguintes características: sensibilidade alta, chegando a ser até três ordens de grandeza maior em relação a um filme de raios-X convencional; faixa dinâmica; linearidade; excelente resolução espacial da ordem de 25 μm . Para recuperar a imagem do IP, um escâner a laser é utilizado para fazer a leitura e digitalização dos dados para visualização no computador e processamento posterior. Ademais, não há necessidade de usar

câmara escura e nem produtos químicos, como fixador e revelador, conforme exigido pelo filme de raios-X convencional. A Figura 7 mostra a excepcional sensibilidade e linearidade do IP em relação ao filme de raios-X convencional quando ambos foram submetidos a diferentes doses de radiação ionizante. A abscissa corresponde às doses de radiação emitidas por uma amostra padrão de isótopo P32, que emite partícula β com energia: $E = 1,7 \text{ MeV}$.

Figura 7. A sensibilidade excepcional do Imaging Plate quando comparada com a do filme de raios-X (esquerda). Mecanismo de luminescência no Imaging Plate (direita).

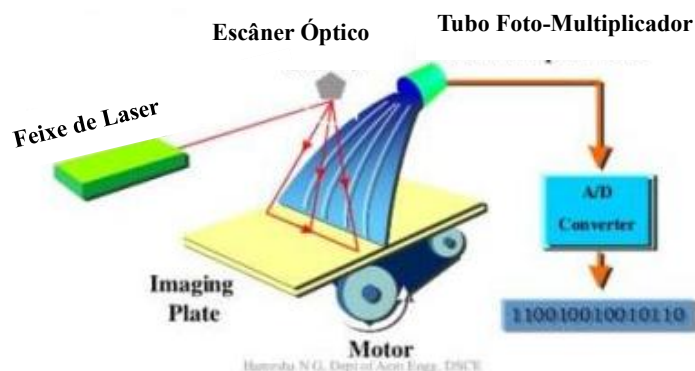


Fonte: FUJIFILM



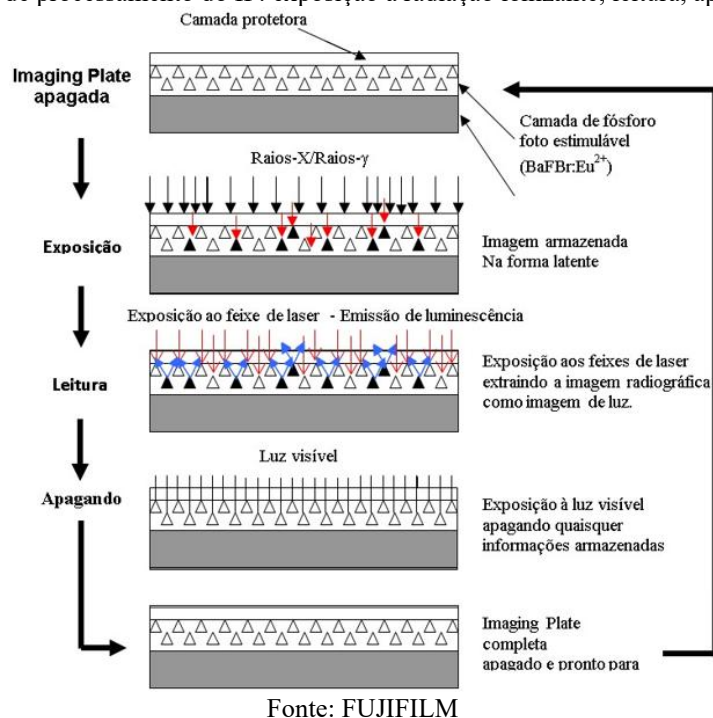
Na figura 7 à esquerda, no eixo das ordenadas à esquerda mostra a quantidade de radiação luminescente acumulada pelo IP e o eixo da ordenada à direita mostra a densidade óptica, o grau de enegrecimento de um filme de raios-X convencional. Essas características também são semelhantes para a radiação de feixes de elétrons, raios-X, raios- γ e partículas β de diferentes energias. A sensibilidade do IP em relação filme de raios-X pode chegar de 100 a 1.000 vezes mais sensível. O processo de Luminescência Opticamente Estimulada (OSL em inglês) é um efeito não linear. A tecnologia utilizada para recuperar as informações do IP é através de um escâner a laser. Por exemplo, quando o feixe de laser 632 nm de laser He-Ne incide sobre a superfície do IP, ocorre a emissão de luminescência de 488 nm por efeito da OSL. Um tubo fotomultiplicador (PMT) capta a emissão de luminescência e, em seguida, um conversor analógico para digital (ADC) converte em sinal digital e a imagem é exibida no monitor do computador, como mostra a figura 8.

Figura 8. Esquema sobre funcionamento do leitor do detector Imaging Plate pelo processo OSL – luminescência estimulado opticamente utilizando laser.



O IP pode ser reutilizado após o processo de apagamento. A figura 9 mostra esquematicamente o procedimento de uso desde exposição, leitura e apagamento para reuso. Para aplicações industriais, dependendo do manuseio do IP, ele pode ser reutilizado até 1.000 vezes.

Figura 9. Procedimento de processamento do IP: exposição à radiação ionizante, leitura, apagamento e reutilização.



Essas características do detector IP abrem novas aplicações ainda não exploradas. Por exemplo, para compensar a baixa taxa de dose de raios-X do betatron em relação aos aceleradores lineares conhecidos como LINACs, IPs podem ser adotados como detectores de imagem radiográfica de alta sensibilidade. Para obter uma imagem radiográfica através do uso do IP, um escâner a laser recupera e digitaliza os dados para o computador para processamento posterior das imagens. Não necessita de uso

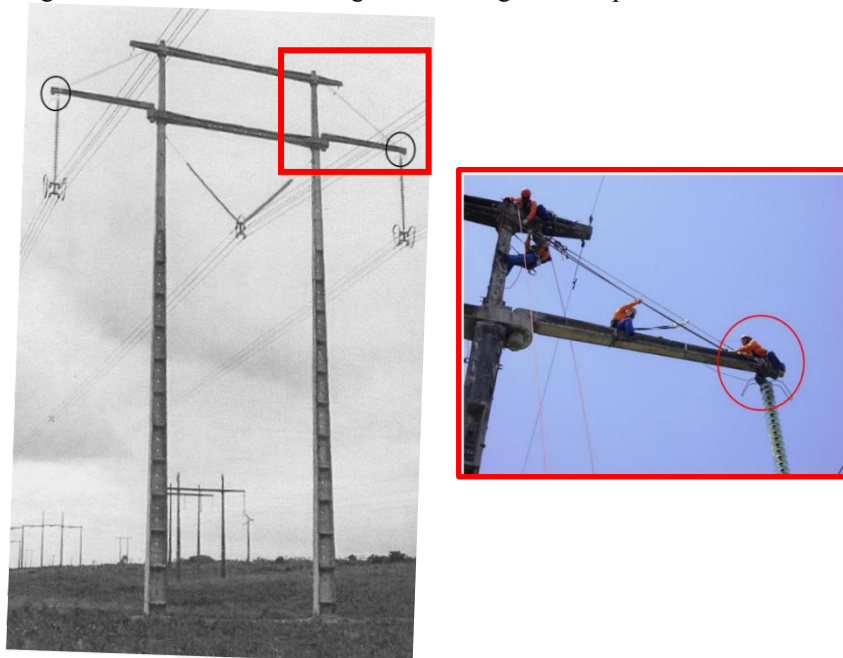
de câmara escura nem produtos químicos, como fixador e revelador, conforme exigido pelo filme de raios-X convencional. Após à exposição do IP à radiação ionizante, a imagem radiográfica é armazenada em modo latente nos cristais de (BaFBr: Eu²⁺), mas logo após a exposição à radiação ionizante, inicia-se um processo de perda de informações devido ao efeito conhecido como fading, portanto realizar a leitura o mais breve possível após à exposição torna-se importante. O procedimento detalhado sobre radiografia computadorizado, que o sistema radiográfico que utiliza o detector radiográfico Imaging Plate, pode ser encontrado, por exemplo, na norma ASTM E2007-10 (reaprovado em 2023).

Na prática, sabe-se que há quatro fatores que mais afetam a qualidade da imagem: (1) falta de nitidez geométrica, chamada de penumbra, essencialmente devido ao tamanho da fonte de radiação “focal spot”; (2) falta de nitidez do filme de raios-X, causada pela dispersão dos elétrons no detector; (3) falta de nitidez devido ao intensificador de imagem, causada pela dispersão da luz na camada fluorescente; (4) falta de nitidez devido ao movimento, causada pelo movimento relativo do objeto e do detector de imagem. Os dois últimos fatores são menos críticos quando a radiografia é realizada no laboratório. Para reduzir o efeito da falta de nitidez geométrica, uma prática interessante é posicionar a fonte de radiação o mais distante possível do objeto de interesse, como mostrado no esquema da figura 4. Nesse caso, a intensidade da radiação diminui em função do quadrado da distância, conforme a Lei de Newton, como ilustrado na figura 5.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

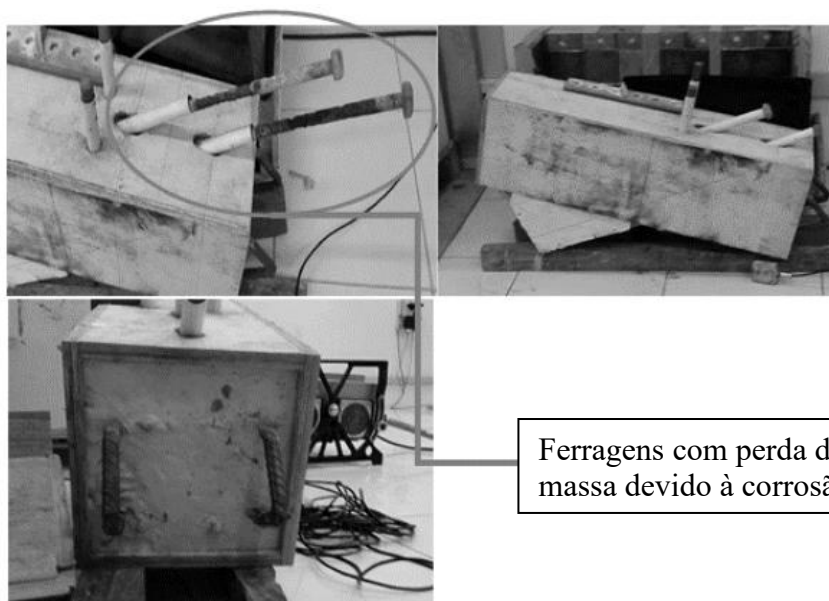
A Figura 10 mostra uma torre de concreto armado no campo com as ferragens de uma linha de transmissão de extra-alta tensão de 500 kV, no nordeste do Brasil. Na foto da direita é mostrada a equipe de linha viva fazendo uma inspeção na torre de concreto armado.

Figura 10. Mostra uma torre de concreto armado no campo com as ferragens de uma linha de transmissão de extra-alta tensão de 500 kV, no nordeste do Brasil. Na foto da direita é mostrada a equipe de linha viva fazendo uma inspeção na torre de concreto armado. A figura também destaca as extremidades circulares que foram reproduzidas e inspecionadas em laboratório usando radiografia de raios-X de alta energia com radiografia computadorizada.



O corpo de prova da estrutura de concreto armado de mesma dimensão de uma estrutura de uma parte da torre de transmissão de 500kV circulada na linha preta mostrada na figura 10 foi reproduzido no laboratório, conforme mostrado na figura 11.

Figura 11. Fotos do concreto armado de secção de 200 mm x 200 mm com várias vistas e as ferragens de aço de 22 mm de diâmetro com danos de corrosão.

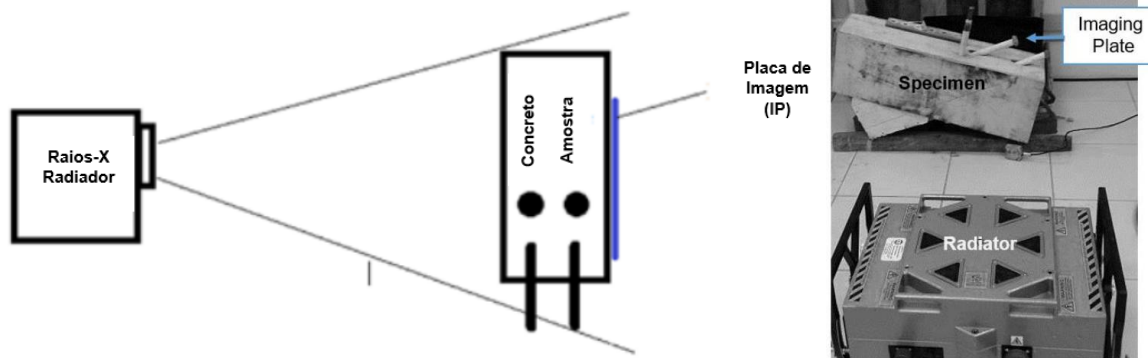


Ferragens com perda de massa devido à corrosão

Para realizar a inspeção radiográfica no corpo de prova de concreto armado com as ferragens de aço, o arranjo experimental está mostrado na figura 12, foram usados raios-X de alta energia do betatron, que é um gerador de raios-X portátil e comercial com uma energia comutável de 2 MeV a 7,5 MeV com um passo de 0,1 MeV e dimensão focal de 0,3 mm x 3 mm (JME, 2010). Na energia máxima de 7,5 MeV, a taxa de dose é de 5R/minuto (44 mGy/min) a 1 metro de distância, o que é 1.000 vezes menor do que um acelerador linear (HALMSHAW, 1995). O sistema de fonte Betatron é composto principalmente de três partes: (i) acelerador de partículas; (ii) unidade de energia e (iii) painel de controle. O acelerador de partículas é conectado por um cabo de alta tensão à unidade de energia. Além disso, é de fácil operação e de fazer a manutenção, mas sua operação em campo é um desafio se a fonte de alimentação de energia não tiver a qualidade adequada.

Para compensar a baixa taxa de dose de raios-X gerado pelo betatron, um detector de raios-X de alta sensibilidade Imaging Plate foi testado com raios-X de alta energia do betatron: HD-IP de 35 cm x 43 cm da Durr, e a leitura do IP foi realizado pelo escâner a laser de alta resolução de 16 bits, modelo HD-CR35 NDT da Durr, ambos da Alemanha. Para a leitura do IP, resolução de 100 µm foi utilizada. Em termos de resolução espacial do IP, que está relacionada à falta de nitidez do detector (U_f) refere-se à capacidade de discernir detalhes. Atualmente, há dois tipos de IP disponíveis comercialmente, que são o "padrão" (sensibilidade mais alta, mas resolução espacial relativamente mais baixa) e o tipo "azul", que apresenta sensibilidade mais alta do que o filme de raios X tradicional, mas mais baixa do que o IP "padrão"; no entanto, ele tem uma resolução espacial mais alta entre os IPs.

Figura 12. Esquema do arranjo experimental usado para radiografia do corpo de prova de concreto armado com aço (à esquerda). A foto da direita mostra as ferragens de aço com danos de corrosão completamente inseridas no corpo de prova, o radiador do betatron, o corpo de prova de concreto armado e Imaging plate dentro do invólucro preto.



Para extrair informações mais detalhadas a partir das imagens radiográficas digital das regiões de interesse (ROI em inglês), da estrutura de concreto armado, o processamento de imagem digital de imagens foi aplicado com um software dedicado ao processamento de imagens radiográficas Isee!, um software desenvolvido pela “Federal Institute for Materials Research and Testing” – BAM, Berlin, Alemanha, para visualização de imagens radiográficas e análise de radiografias industriais usando o sistema operacional Microsoft Windows (ALEKSEYCHUK and ZSCHERPEL, 2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As imagens radiográficas das ferragens com corrosão no interior do concreto armado foram obtidas com raios-X de alta energia usando o detector IP HD-IP da Durr de dimensão de 35 cm x 43 cm, com os seguintes parâmetros radiográficos: energia de raios-X de 5 MeV, tempo de exposição de 600 s e a distância da fonte de raios-X até o IP de 1 m, e de acordo com os esquemas mostrados na figura 13, sem levar em consideração o efeito de espalhamento de raios-X devido ao efeito Compton no interior do concreto armado. As imagens radiográficas mostradas são imagens digitais positiva e negativa como foram obtidas, isto é, sem processamento de imagem digital.

Figura 13. Imagens radiográficas positiva e negativa das ferragens com danos de corrosão no concreto armado como foram obtidas através de raios-X de alta energia e detetor Imaging Plate Durr Blue HD-IP lido por escâner a laser HD NDT da Durr após exposição de 600 s.

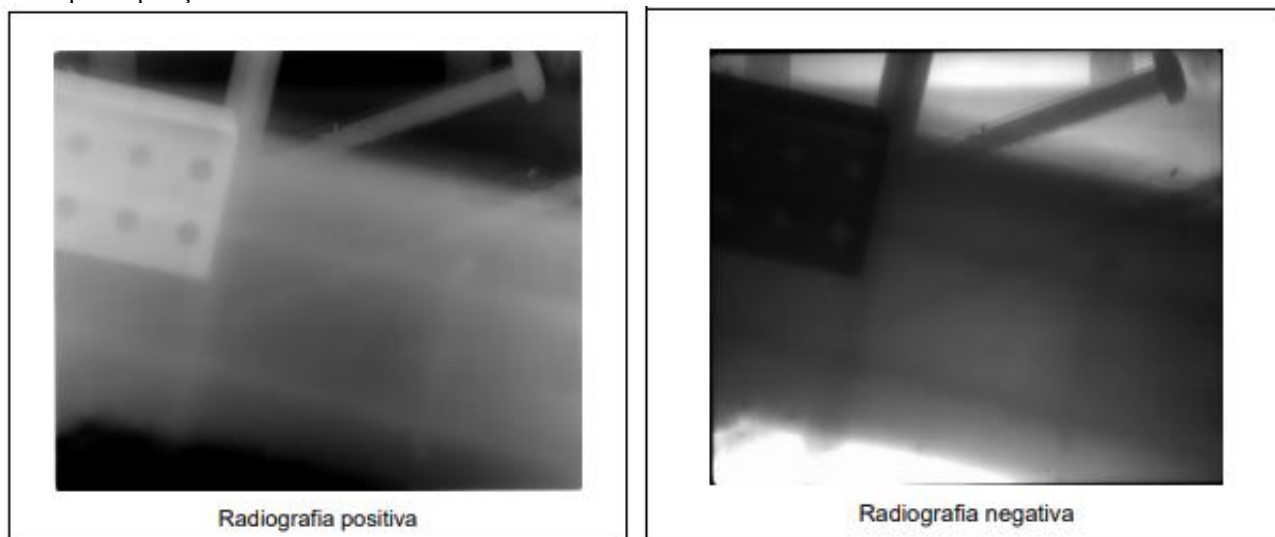
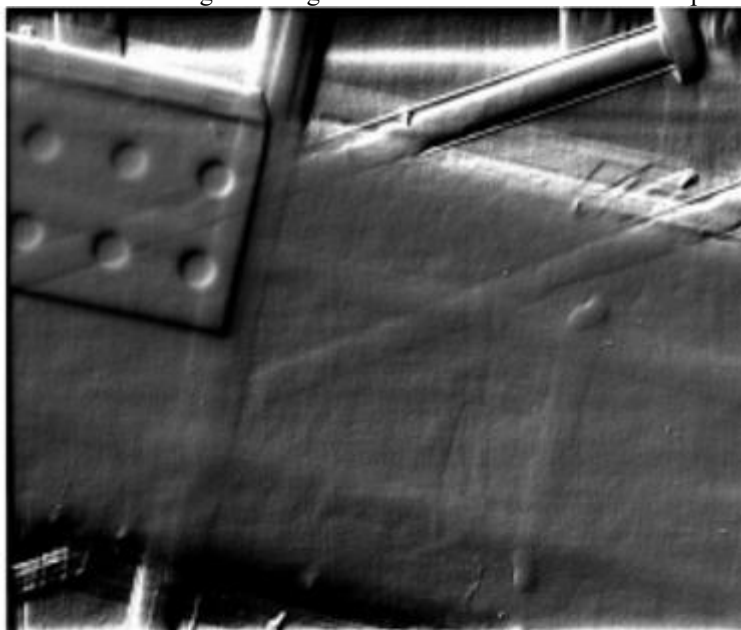
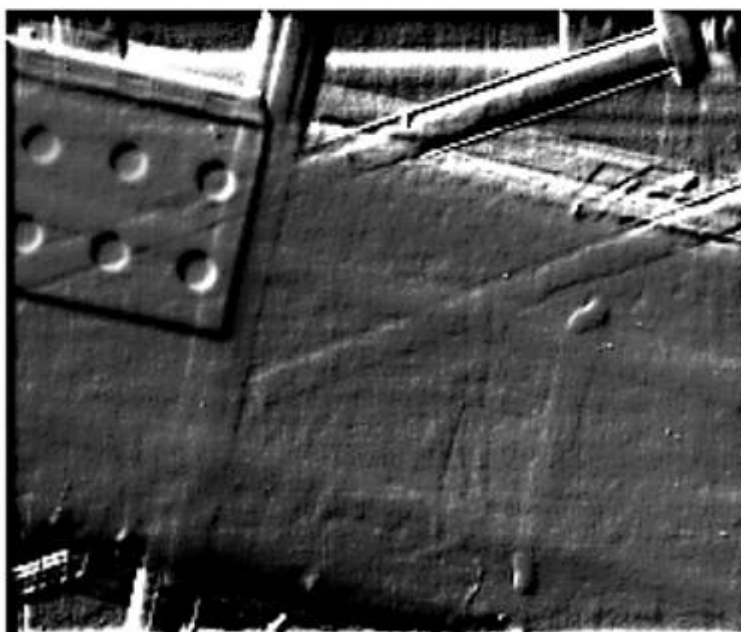


Figura 14. Imagens radiográficas das ferragens com danos de corrosão no interior de concreto armado após o processamento digital da imagem com o software ISee! Imagem radiográfica de baixo foi adicionalmente processada realçando a nitidez.



Filtro matemático pseudoplast do software Isee!



Filtro matemático pseudoplast do software Isee!

Analisando as imagens radiográficas após o processamento de imagem mostradas na figura 14, pode-se verificar que a utilização do Imagem Plate HD-IP azul da Durr, leitura com o leitor de IP de alta resolução da Durr proporcionou uma melhora substancial na visualização do resultado em termos de qualidade de imagem radiográfica e resolução espacial, onde é possível observar as ferragens de aço corroídas com maior contraste e avaliar a resistência mecânica. Além disso, o processamento de imagens digitais melhora substancialmente a qualidade da imagem dos vergalhões para uma avaliação mais detalhada da integridade estrutural do concreto armado.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, uma imagem radiográfica de qualidade das ferragens de aço com danos de corrosão, posicionadas no interior do concreto armado de seção quadrada de 200 mm x 200 mm, foi obtida utilizando um sistema radiográfico computadorizado de alta energia. O detetor Imaging Plate e o leitor de IP de alta resolução foram empregados, sem considerar o espalhamento de raios-X resultante devido ao efeito Compton. O raios-X de alta energia foi gerado por um betatron portátil. O objetivo foi de avaliar o potencial aplicativo do sistema radiográfico computadorizado para avaliação da integridade das ferragens de aço de 22 mm de diâmetro com danos de corrosão usando raios-X de energia de 5 MeV. Para realçar a região de interesse das ferragens de aço com danos devido à corrosão, o processamento de imagem digital foi realizado com software dedicado ISee!

O tempo de exposição de 600 segundos foi suficiente para obter uma imagem radiográfica de qualidade para avaliação da integridade das ferragens de aço no interior do concreto armado, principalmente após o processamento da imagem radiográfica digital. Portanto, o presente experimento com o sistema de radiografia computadorizado de alta energia usando o detector de alta sensibilidade Imaging Plate pode abrir novas aplicações ainda não exploradas no setor elétrico de extra-alta tensão, principalmente após realizar testes prévios em laboratório de alta tensão para certificar o efeito de raios-X de alta energia em linha energizada. Ademais, de acordo com Halmshaw (1995), a qualidade da imagem radiográfica poderá ser melhorada reduzindo a influência do espalhamento de raios-X devido ao efeito Compton.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pela preparação do corpo de prova de concreto armado utilizado no presente trabalho. Agradecemos também ao Dr. Rodrigo Palha pela colaboração na realização da radiografia de raios-X de alta energia do concreto reforçado com aço, ao CRCN/CNEN - Centro Regional de Ciências

Nucleares - Conselho Nacional de Energia Nuclear do Brasil por disponibilizar suas instalações laboratoriais para a realização dos testes radiográficos de raios-X de alta energia, e à ELETROBRAS/CHESF pelo apoio financeiro para desenvolver o sistema de radiográfico de alta energia.

REFERÊNCIAS

- ALEKSEYCHUK, A.; ZSCHERPEL, U. Isee! Disponível em: <https://www.uzscherpel.de/BAM/ic/index.html>. Acesso em: maio 2025.
- AMEMIYA, Y.; MIYAHARA, J. Imaging Plate Illuminates Many Fields. *Nature*, [S.l.], v. 336, n. 3, 1988.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Portal Gov.br. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em: maio 2025.
- ANTON, O.; HERMANKOVA, V. Experimental Testing of the Applicability of Betatron in Construction Radiography. *Transactions of Transport Sciences*, [S.l.], v. 2, n. 4, p. 196-205, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E2007-10(2023): Standard Guide for Computed Radiography. Disponível em: <https://www.astm.org>. Acesso em: maio 2025.
- BRITANNICA. Compton Effect. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/Compton-effect>. Acesso em: maio 2025.
- CIVA-RT. Simulation Software for Non-Destructive Testing CIVA NDE10. Extende CIVA, 2011.
- FUJIFILM EUROPE. Imaging Plates. Disponível em: <https://www.fujifilm.com/de/em>. Acesso em: maio 2025.
- GARCIA, R. W. S.; TORRES, M. S.; SILVA, F. R.; GOMES, E.; BADE, S. A.; ARGOLO, J. A. Natural and Accelerated Aging of Composite Insulators. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, 1998, [S.l.]. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239). [S.l.]: IEEE, 1998. p. 1-6.
- HALMSHAW, R. Industrial Radiology: Theory and Practice. 2. ed. [S.l.]: Springer-Science+Business Media, 1995.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. Vienna: IAEA, 2002. (Training Course Series, n. 17). Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-17_web.pdf. Acesso em: maio 2025.
- IOWA STATE UNIVERSITY. Radiography Testing. Nondestructive Evaluation Techniques - Radiography – Definition. Center for Nondestructive Evaluation. Disponível em: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Radiography/TechCalibrations/definition.xhtml>. Acesso em: maio 2025.
- JAENISH, G.; EWERT, U.; JECHOW, M. Radiação de dispersão em radiografia. In: EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING, 10., 2010, Moscou. Anais [...]. Moscou: [s.n.], 2010.
- JME ADVANCED INSPECTION SYSTEMS. JME Portable 7.5 MeV, PXB-7.5M for radiographic nondestructive testing – Operating Manual. Reino Unido: [s.n.], 2010.

KELLER, W. J.; PESSIKI, S. Experimental Validation of a Numerical Model for Simulating Radiographic Imaging of Portland Cement-Based Materials. *Journal of Nondestructive Evaluation*, [S.l.], v. 34, n. 18, 2015. DOI: 10.1007/s10921-015-0291-y.

KOLKOORI, S.; WROBEL, N.; OSTERLOH, K.; ZSCHERPEL, U.; EWERT, U. High Energy X-Ray Imaging Technology for the Detection of Dangerous Materials in Air Freight Containers. In: *IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGIES FOR HOMELAND SECURITY*, 2015, Waltham, MA. Anais [...]. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 1-6.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

NERI, M. G. G. Avaliação de técnicas de monitoramento de isoladores poliméricos. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

REDMER, B.; LIKHATCHEV, A.; WEISE, F.; EWERT, U. Location of Reinforcement in Structures by Different Methods of Gamma-Radiography. In: *SIMPÓSIO INTERNACIONAL*, 2003, Berlin. Anais [...]. Berlin: [s.n.], 2003.

RYCHKOV, M. M.; KAPLIN, V. V.; SMOLYANSKIY, V. A. Spatial Resolution of Images and Effective Focus Size of Bremsstrahlung of an Improved Compact Betatron SEA-7 with Electron Energy of 7 MeV. *Instruments and Experimental Techniques*, [S.l.], v. 67, p. 94-100, 2024.

SHAW, P.; PEDERSON, T.; SERLUPPENS, R. High Energy Radiography combined with the Agfa Strukturix DPS - imaging system and comparison with other NDE - methods for inspection of thick reinforced concrete structures. *NDT*, [S.l.], v. 5, n. 8, 2000.

TATENO, Y.; IINUMA, T.; TAKANO, M. *Computed Radiography*. [S.l.]: Springer, 1987.